



UNIVERSIDAD DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CUENCA



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS
DE LA LÍNEA CUENCA-MACAS CON LA APLICACIÓN DEL
SIMULADOR ATP PARA LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL
CENTRO SUR C.A.”**

*Tesis previa a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico*

Autor:
Sergio Ramiro Paredes Quito

Director:
Ing. Pedro León

Tutores:
Ing. Santiago Machado
Ing. Patricio Quituisaca

**Cuenca – Ecuador
2011**

AUTOR: SERGIO PAREDES QUITO



UNIVERSIDAD DE CUENCA

DECLARACIÓN

Las ideas expresadas en la presente tesis, son
Responsabilidad del autor.

(f) -----
Sergio Ramiro Paredes Quito.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CERTIFICACIÓN

Certifico que bajo de dirección la
tesis fue realizada por el señor:

Sergio Ramiro Paredes

(f) -----

Ing. Pedro León.

DIRECTOR



DEDICATORIA

“Acoge mis palabras, hijo mío, guarda mi enseñanza, que tu oído se abra a la sabiduría, que tu corazón se doblegue a la verdad, apela a la inteligencia y déjate guiar por la razón; busca la sabiduría como el dinero, como un tesoro escondido: entonces penetrarás en el temor de Yavé y hallarás el conocimiento de Dios.”

(Proverbios 2:1-5)

Dedico esta tesis primeramente a Dios, quien me regalo la vida, me ha dado todo y que gracias a Él soy lo que soy.

A mis padres, especialmente a mi mamá María Rosario Quito que con su amor y preocupación incondicional supo hacer de mí una persona de bien.

A todas las hermanas de la Comunidad Asuncionista, ya que ellas con sus consejos, con su manera de predicar la palabra de Dios, hicieron de mí un misionero al servicio de Dios.

A todos mis amigos que compartieron momentos buenos y malos, y que de una u otra manera me ayudaron a madurar como persona.

Finalmente, y no por ello menos importante, dedico esta tesis a todos mis lectores



AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios, todopoderoso y misericordioso, por haberme dado la vida y haberme brindado la fortaleza necesaria para avanzar día a día e ir cumpliendo todo lo que me he propuesto.

Agradezco a mi director de tesis, Ing. Pedro León quien desinteresadamente se hizo cargo para guiarme en desarrollo de este tema de investigación.

A mis tutores de Tesis, Ingenieros Santiago Machado y Patricio Quituisaca, quienes me guiaron y me colaboraron incondicionalmente en la realización de este proyecto.

A la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A., por brindarme la oportunidad de desarrollar mi tema de investigación.

A la Universidad de Cuenca quien me formo intelectualmente para ser un buen profesional.

A todos los que fueron compañeros de clases, ya que de ellos he aprendido muchísimo para llegar a ser lo que soy.



RESUMEN

En el presente proyecto, se determinan los niveles de tensión que aparecen en los extremos de la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, tanto en el nodo envío como en el nodo receptor debido al efecto Ferranti.

También se determinan los niveles de tensión y de corriente en las fases, debido a una falla monofásica en cada una de las cinco subestaciones que pertenecen a este subsistema. Además, con los valores de sobretensiones por falla monofásica se establece un procedimiento para la selección del pararrayos en base a la norma IEC, cuyo pararrayos dimensionado sirve para las simulaciones de maniobras de energización, desenergización y descarga atmosférica en la línea de subtransmisión.

Los dos estudios antes mencionados se los realiza con el programa computacional Alternative Transient Program (ATP).

Mediante el Alternative Transient Program (ATP) y bajo la utilización de “interruptores estadísticos” se procede a realizar simulaciones de maniobras de energización y desenergización en la línea de subtransmisión en estudio, mediante las cuales, se determinaron los niveles de sobretensión en cada una de las subestaciones que pertenecen a la línea de subtransmisión, las simulaciones se las realiza sin considerar los pararrayos en las subestaciones, y después se incluyen los respectivos pararrayos en cada una de las subestaciones; obteniéndose para estos la energía absorbida hacia tierra, como consecuencia de la limitación de las sobretensiones.

Por último se realiza las simulaciones de descargas atmosféricas en cada una de las subestaciones tanto en la fase de la línea como en el cable de guarda; obteniéndose de esta manera las sobretensiones, las sobrecorrientes y la energía absorbida por los pararrayos en cada subestación.

La combinación del estudio de la parte teórica y la simulación, permite presentar de manera global las respectivas conclusiones y recomendaciones.



CONTENIDO

DECLARACIÓN	2
CERTIFICACIÓN	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	6
CONTENIDO	7
ÍNDICE DE CUADROS	12
ÍNDICE DE FIGURAS	20
GLOSARIO DE ELEMENTOS	30
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	31
1.1 INTRODUCCIÓN	31
1.2 OBJETIVOS	31
1.2.1 Objetivo General	31
1.2.2 Objetivos Específicos	31
1.3 ALCANCE	32
1.4 JUSTIFICACIÓN	32
1.5 METODOLOGÍA	32
CAPITULO II: SOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN	33
2.1 DEFINICIÓN DE SOBRETENSIONES	33
2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES	33



2.3 FORMAS DE ONDA NORMALIZADAS DE SOBRETENSIONES.....	35
2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE SOBRETENSIONES	38
2.4.1 Tensión de frecuencia industrial permanente	38
2.4.2 Sobretensiones temporales.....	38
2.4.3 Sobretensiones transitorias.....	39
2.4.3.1 Sobretensión transitoria de frente lento	39
2.4.3.2 Sobretensión transitoria de frente rápido.....	39
2.4.3.3 Sobretensión transitoria de frente muy rápido.....	39
2.4.4 Sobretensión combinada.....	39
2.5 ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE SOBRETENSIONES TEMPORALES O DE FRECUENCIA INDUSTRIAL.....	39
2.5.1 Fallas a tierra.....	40
2.5.2 Rechazo de carga.....	41
2.5.3 Efecto Ferranti	42
2.5.4 Resonancia y Ferroresonancia	43
2.5.5 Combinación de sobretensiones temporales.....	44
2.6 ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DE FRENTE LENTO O POR MANIOBRA	44
2.6.1 Energización y recierre de líneas de transmisión.....	45
2.6.1.1 Energización de líneas de transmisión	46
2.6.1.2 Recierre de líneas de transmisión	47
2.6.2 Maniobras de capacitores y reactores.....	49
2.6.2.1 Circuitos capacitivos.....	50
2.6.2.2 Circuitos inductivos.....	51
2.6.3 Rechazo de carga.....	53
2.7 ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DE FRENTE RÁPIDO O POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	54
2.7.1 Sobretensiones originadas por descargas atmosféricas	54
2.7.1.1 Propiedades de la descarga atmosférica [4]	54
2.7.1.2 Tipos de incidencia de descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión.....	55
2.7.2 Sobretensiones originadas por maniobras.....	57
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ATP.....	58
3.1 INTRODUCCIÓN.....	58
3.2 MODELOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN EN ATPDRAW	61
3.2.1 Fuentes equivalentes del sistema	61
3.2.2 Líneas de transmisión.....	62
3.2.2.1 Modelo JMarti	63
3.2.3 Interruptores	66
3.2.4 Transformador.....	68



3.2.5 Pararrayos	69
------------------------	----

CAPITULO IV: APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS A LA LINEA DE SUBTRANSMISIÓN CUENCA-MACAS, UTILIZANDO EL SIMULADOR ATP..... 71

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO EN ESTUDIO.....	71
4.1.1 Características de los conductores.....	75
4.1.2 Características de las estructuras.....	75
4.1.2.1 Estructura SL-CL	75
4.1.2.2 Estructura ACACIA/SER	76
4.1.3 Equivalentes de Thévenin	77
4.1.5 Cargas en las subestaciones	78
4.2 SOBRETENSIONES TEMPORALES	80
4.2.1 Efecto Ferranti	83
4.2.1.1 Efecto Ferranti en la Subestación Macas	83
4.2.1.2 Efecto Ferranti en la Subestación Cuenca Rayoloma	84
4.2.2 Falla fase – tierra	85
4.2.2.1 Falla fase-tierra en la subestación Cuenca Rayoloma	86
4.2.2.1.1 Falla fase-tierra en la subestación Cuenca Rayoloma al nivel de 69kV.	86
4.2.2.1.1 Falla fase-tierra la subestación Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV.	91
4.2.2.2 Falla fase-tierra en la subestación Gualaceo	100
4.2.2.2.1 Falla fase-tierra en la Subestación Gualaceo a nivel de 69kV.	100
4.2.2.2.2 Falla fase-tierra en la Subestación Gualaceo al nivel de 138kV.	105
4.2.2.3 Falla fase-tierra en la subestación Limón	113
4.2.2.3.1 Falla fase-tierra en la Subestación Limón a nivel de 69kV.	113
4.2.2.3.2 Falla fase-tierra en la Subestación Limón al nivel de 138kV.	118
4.2.2.4 Falla fase-tierra en la subestación Méndez	126
4.2.2.4.1 Falla fase-tierra en la Subestación Méndez a nivel de 69kV.	126
4.2.2.4.2 Falla fase-tierra en la Subestación Méndez al nivel de 138kV.	131
4.2.2.5 Falla fase-tierra en la subestación Macas	139
4.2.2.5.1 Falla fase-tierra en la Subestación Macas a nivel de 69kV.	139
4.2.2.5.2 Falla fase-tierra en la Subestación Macas a nivel de 138kV.	144
4.3 ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES POR MANIOBRAS	151
4.3.1 Energización en vacío de la línea Cuenca-Macas, desde la subestación Cuenca Rayoloma, sin pararrayos.	153
4.3.1.1 Nivel de 69kV.....	153
4.3.1.2 Nivel de 138 kV.....	155
4.3.2. Energización en vacío de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Macas, sin pararrayos.	155
4.3.2.1 Nivel de 69 kV.....	155
4.3.2.2. Nivel de 138 kV.....	156



UNIVERSIDAD DE CUENCA

4.3.3. Energización en vacío de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Gualaceo, sin pararrayos.	157
4.3.3.1 Nivel de 69 kV.	157
4.3.3.2 Nivel de 138 kV.	157
4.3.4. Energización en vacío de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Méndez, sin pararrayos.	158
4.3.4.1 Nivel de 69 kV.	158
4.3.4.2 Nivel de 138 kV.	158
4.3.5. Energizaciones en vacío de la línea Cuenca-Macas, considerando los pararrayos en las subestaciones.	159
4.3.5.1 Energización desde la subestación Cuenca Rayoloma a nivel de 69kV y 138kV.	159
4.3.5.2 Energización desde la subestación Gualaceo, a nivel de 69kV y 138kV.	160
4.3.5.3 Energización desde la subestación Méndez, a nivel de 69kV y 138kV.	162
4.3.5.4 Energización desde la subestación Macas, a nivel de 69kV y 138kV.	163
4.3.6. Maniobras de desenergización de la línea de subtransmisión Cuenca-Macas.	164
4.3.6.1 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Cuenca Rayoloma, a nivel de 69kV.	164
4.3.6.2 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Cuenca Rayoloma, a nivel de 138kV.	165
4.3.6.3 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Macas, a nivel de 69kV.	165
4.3.6.4 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Macas a nivel de 138kV.	166
4.3.6.5 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Gualaceo a nivel de 69kV.	166
4.3.6.6. Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Gualaceo a nivel de 138kV.	167
4.3.6.7. Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Méndez a nivel de 69kV.	167
4.3.6.8. Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Méndez a nivel de 138kV.	168
4.4 ANÁLISIS DE TRANSITORIOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	168
4.4.1 Descarga atmosférica en la subestación Cuenca Rayoloma a nivel de 69kV.	169
4.4.2 Descarga atmosférica en la subestación Cuenca Rayoloma, a nivel de 138kV.	177
4.4.3 Descarga atmosférica en la subestación Gualaceo a nivel de 69kV.	177
4.4.4 Descarga atmosférica en la subestación Gualaceo a nivel de 138kV.	178
4.4.5 Descarga atmosférica en la subestación Limón a nivel de 69kV.	179
4.4.6 Descarga atmosférica en la subestación Limón a nivel de 138kV.	179
4.4.7 Descarga atmosférica en la subestación Méndez a nivel de 69kV.	180
4.4.8 Descarga atmosférica en la subestación Méndez a nivel de 138kV.	180
4.4.9 Descarga atmosférica en la subestación Macas a nivel de 69kv.	181
4.4.10 Descarga atmosférica en la subestación Macas a nivel de 138kV.	181
4.4.11 Descarga atmosférica en el cable de guarda a nivel de 69kV.	182
4.4.12 Descarga atmosférica en el cable de guarda a nivel de 138kV.	188



CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	189
5.1 CONCLUSIONES.....	189
5.2 RECOMENDACIONES.....	192
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	194
ANEXO A: ESPECÍFICACIÓN Y CÁLCULO DE PARARRAYOS, A NIVEL DE TENSIÓN DE 138KV Y 69KV	196
ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DEL PARARRAYOS A SER UTILIZADO.....	203
ANEXO C: ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	206
ANEXO D: INSTALACIÓN DEL ATPDRAW	210
ANEXO E: EXPLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE UN CASO ESPECÍFICO EN ATPDRAW.....	217



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2. 1 Correspondencia de la clasificación de las sobretensiones.	35
Cuadro 2. 2 Clases, formas de onda y rango de parámetros de tensiones y sobretensiones	37
Cuadro 4. 1 Datos de los transformadores de dos devanados (69kV)	74
Cuadro 4. 2 Datos de los transformadores de tres devanados (69kV)	74
Cuadro 4. 3 Datos de los transformadores de dos devanados (138kV)	74
Cuadro 4. 4 Características principales del sistema	75
Cuadro 4. 5 Características de los conductores	75
Cuadro 4. 6 Equivalentes de Thévenin en la subestación Cuenca Rayoloma y en la central Hidroabánico a nivel de 69kV.	78
Cuadro 4. 7 Equivalentes de Thévenin en la subestación Cuenca Rayoloma a nivel de 138kV.	78
Cuadro 4. 8 Potencia de las cargas y sus respectivas impedancias para el nivel de tensión de 69kV-2011, demanda mínima.	79
Cuadro 4. 9 Potencia de las cargas y sus respectivas impedancias para el nivel de tensión de 138kV-2012, demanda mínima	79
Cuadro 4. 10 Potencia de las cargas y sus respectivas impedancias para el nivel de tensión de 138kV-2015, demanda mínima	80
Cuadro 4. 11 Potencia de las cargas y sus respectivas impedancias para el nivel de tensión de 138kV-2020, demanda mínima	80
Cuadro 4. 12 Tensiones y corrientes en la línea de subtransmisión Cuenca- Macas, en condiciones normales, a nivel de 69 kV. (mínima demanda)	82
Cuadro 4. 13 Tensiones y corrientes en la línea de subtransmisión Cuenca- Macas, en condiciones normales, a nivel de 138kV. (mínima demanda)	82
Cuadro 4. 14 Tensiones y corrientes en la línea de subtransmisión Cuenca- Macas, en condiciones normales, a nivel de 138kV. (máxima demanda)	83
Cuadro 4. 15 Tensiones resultantes por el efecto Ferranti en la S/E Macas ..	84
Cuadro 4. 16 Tensiones resultantes por el efecto Ferranti en la S/E Cuenca Rayoloma	85



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 17 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 69kV. (Demanda mínima)	91
Cuadro 4. 18 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2012; en demanda mínima.	98
Cuadro 4. 19 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2012; en demanda máxima.	98
Cuadro 4. 20 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2015; en demanda mínima	99
Cuadro 4. 21 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2015; en demanda máxima	99
Cuadro 4. 22 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2020; en demanda mínima.	99
Cuadro 4. 23 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2020; en demanda máxima.	100
Cuadro 4. 24 Sobretensiones y Sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo al nivel de 69kV; en demanda mínima.....	105
Cuadro 4. 25 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2012, en demanda mínima.....	111
Cuadro 4. 26 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2012, en demanda máxima.	111
Cuadro 4. 27 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2015, en demanda mínima.....	112
Cuadro 4. 28 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2015, en demanda máxima.	112
Cuadro 4. 29 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2020, en demanda mínima.....	112



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 30 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2020, en demanda máxima.	113
Cuadro 4. 31 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 69kV, en demanda mínima.	118
Cuadro 4. 32 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2012, en demanda mínima.	124
Cuadro 4. 33 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2012, en demanda máxima.	124
Cuadro 4. 34 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2015, en demanda mínima.	125
Cuadro 4. 35 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2015, en demanda máxima.	125
Cuadro 4. 36 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2020, en demanda mínima.	125
Cuadro 4. 37 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2020, en demanda máxima.	126
Cuadro 4. 38 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 69kV, en demanda mínima.	131
Cuadro 4. 39 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2012, en demanda mínima.	137
Cuadro 4. 40 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2012, en demanda máxima.	137
Cuadro 4. 41 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2015, en demanda mínima.	138
Cuadro 4. 42 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2015, en demanda máxima.	138



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 43 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2020, en demanda mínima.....	138
Cuadro 4. 44 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2020, en demanda máxima.	139
Cuadro 4. 45 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 69kV, en demanda mínima.	144
Cuadro 4. 46 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2012, en demanda mínima.....	149
Cuadro 4. 47 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2012, en demanda máxima.	150
Cuadro 4. 48 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2015, en demanda mínima.....	150
Cuadro 4. 49 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2015, en demanda máxima.	150
Cuadro 4. 50 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2020, en demanda mínima.....	151
Cuadro 4. 51 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2020, en demanda máxima.	151
Cuadro 4. 52 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 69kV, sin pararrayos.....	154
Cuadro 4. 53 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV, sin pararrayos.....	155
Cuadro 4. 54 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 69kV, sin pararrayos.....	156
Cuadro 4. 55 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Macas, al nivel de 138kV, sin pararrayos.....	156



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 56 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV, sin pararrayos.....	157
Cuadro 4. 57 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV, sin pararrayos.....	157
Cuadro 4. 58 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 69kV.	158
Cuadro 4. 59 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 138kV.....	158
Cuadro 4. 60 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 69kV, con pararrayos.....	159
Cuadro 4. 61 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 69kV.....	160
Cuadro 4. 62 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV, con pararrayos.....	160
Cuadro 4. 63 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV.	160
Cuadro 4. 64 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV, con pararrayos.....	161
Cuadro 4. 65 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV.....	161
Cuadro 4. 66 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV, con pararrayos.....	161
Cuadro 4. 67 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV.	161
Cuadro 4. 68 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 69kV, con pararrayos.....	162



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 69 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 69kV.....	162
Cuadro 4. 70 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 138kV, con pararrayos.....	162
Cuadro 4. 71 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 138kV.....	162
Cuadro 4. 72 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 69kV, con pararrayos.....	163
Cuadro 4. 73 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 69kV.....	163
Cuadro 4. 74 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 138kV, con pararrayos.....	163
Cuadro 4. 75 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 138kV.....	163
Cuadro 4. 76 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 69kV.....	164
Cuadro 4. 77 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV.....	165
Cuadro 4. 78 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Macas, al nivel de 69kV.....	165
Cuadro 4. 79 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Macas, al nivel de 138kV...	166
Cuadro 4. 80 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV.	167
Cuadro 4. 81 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV.....	167
Cuadro 4. 82 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Méndez, al nivel de 69kV...	168



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 83 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Méndez, al nivel de 138kV.	168
Cuadro 4. 84 Resumen de sobretensiones en las subestaciones, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca, a nivel de 69kV.....	172
Cuadro 4. 85 Resumen de corrientes en las subestaciones, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca, a nivel de 69kV.	175
Cuadro 4. 86 Resumen de las energías disipadas por los pararrayos en cada una de las fases, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca, a nivel de 69kV.	176
Cuadro 4. 87 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por los pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV-2012	177
Cuadro 4. 88 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV.	178
Cuadro 4. 89 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2012	178
Cuadro 4. 90 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Limón, al nivel de 69kV.	179
Cuadro 4. 91 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Limón, al nivel de 138kV-2012	179
Cuadro 4. 92 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Méndez, al nivel de 69kV.....	180
Cuadro 4. 93 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2012.....	180
Cuadro 4. 94 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Macas, al nivel de 69kV.....	181
Cuadro 4. 95 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Macas, al nivel de 138kV-2012.....	181



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 96 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas, al nivel de 69kV.	188
Cuadro 4. 97 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas, al nivel de 138kV-2012.	188
Cuadro A. 1 Datos generales del sistema en estudio	196
Cuadro A. 2 Magnitudes de las sobretensiones a considerarse en el procedimiento	196
Cuadro A. 3 Características del pararrayos a nivel de 138kV.....	200
Cuadro A. 4 Características del pararrayos a nivel de 69kV	200
Cuadro A. 5 Corriente vs porcentaje de Tensión residual para un impulso tipo rayo de 10kA (8/20).....	201
Cuadro A. 6 Característica de corriente vs tensión del pararrayos a 69kv ...	201
Cuadro A. 7 Característica de corriente vs tensión del pararrayos a 138kV	202
Cuadro B. 1 Condiciones normales de operación	203
Cuadro B. 2 Datos técnicos	203
Cuadro B. 3 Características de protección del pararrayos	204



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Máximos valores de sobretensiones temporales debido a ocurrencias de fallas en función de la resistencia del sistema	41
Figura 2. 2 (a) Rechazo de carga en un sistema radial, (b) Diagrama fasorial antes del rechazo de carga, (c) Diagrama fasorial después del rechazo de carga	42
Figura 2. 3 Transitorios de energización de líneas	46
Figura 2. 4 Diagrama y Formas de Ondas Básicas para la tensión en una maniobra de reconexión.....	48
Figura 2. 5 Sobretensiones producidas cuando es desenergizada una línea terminada en un transformador.....	49
Figura 2. 6 Apertura de un circuito capacitivo.....	51
Figura 2. 7 Apertura de un circuito inductivo	52
Figura 2. 8 Reconexión y aumento de la tensión de circuitos inductivos	53
Figura 3. 1 Interacción entre los diferentes programas de ATP-EMTP.....	61
Figura 3. 2 Ventana de la fuente empleada.	62
Figura 3. 3 Ventana de datos para equivalente de Thévenin trifásico	62
Figura 3. 4 Cuadro de diálogo del modelo de línea de la rutina LCC	64
Figura 3. 5 Cuadro de diálogo de los parámetros geométricos de la rutina LCC	65
Figura 3. 6 Ventana de la clase de interruptores.....	66
Figura 3. 7 Cuadro de diálogo para el interruptor estadístico	67
Figura 3. 8 Cuadro de diálogo para la rutina SATTRAFO trifásico	68
Figura 3. 9 Cuadro de diálogo para la característica de saturación, corriente vs tensión del transformador	69
Figura 3. 10 Cuadro de diálogo del modelo MOV type 92 3-ph.....	70
Figura 4. 1 Diagrama Unifilar de la Línea de Subtransmisión Cuenca – Macas a 69kV	72
Figura 4. 2 Diagrama Unifilar de la Línea de Subtransmisión Cuenca – Macas a 138 kV.....	73



Figura 4. 3 Estructura SL-CL	76
Figura 4. 4 Estructura ACACIA/SER	77
Figura 4. 5 Diagrama de la línea de subtransmisión Cuenca-Macas a 69kV en condiciones normales, en ATPDraw.....	81
Figura 4. 6 Diagrama de la línea de subtransmisión Cuenca-Macas a 138kV en condiciones normales, en ATPDraw.....	81
Figura 4. 7 Diagrama en ATPDraw para la simulación del efecto ferranti en la S/E Macas.....	84
Figura 4. 8 Diagrama utilizado en ATPDraw para la simulación del efecto Ferranti en la S/E Cuenca Rayoloma.	84
Figura 4. 9 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)	86
Figura 4. 10 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)	87
Figura 4. 11 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)	87
Figura 4. 12 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)	88
Figura 4. 13 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)	88
Figura 4. 14 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)	89
Figura 4. 15 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)	89
Figura 4. 16 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)	90
Figura 4. 17 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	92



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 4. 18 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	92
Figura 4. 19 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	93
Figura 4. 20 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	93
Figura 4. 21 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	94
Figura 4. 22 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	94
Figura 4. 23 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	95
Figura 4. 24 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	95
Figura 4. 25 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	96
Figura 4. 26 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)	96
Figura 4. 27 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)	100
Figura 4. 28 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)	101
Figura 4. 29 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)	101
Figura 4. 30 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)	102
Figura 4. 31 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)	102



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 4. 32 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)	103
Figura 4. 33 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)	103
Figura 4. 34 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)	104
Figura 4. 35 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012).....	105
Figura 4. 36 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)	106
Figura 4. 37 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)	106
Figura 4. 38 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)	107
Figura 4. 39 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)	107
Figura 4. 40 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012).....	108
Figura 4. 41 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)	108
Figura 4. 42 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)	109
Figura 4. 43 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)	109
Figura 4. 44 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)	110



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 4. 45 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)	113
Figura 4. 46 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)	114
Figura 4. 47 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)	114
Figura 4. 48 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)	115
Figura 4. 49 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)	115
Figura 4. 50 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)	116
Figura 4. 51 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla a tierra monofásica en la S/E Limón (69kV). 116	
Figura 4. 52 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla a tierra monofásica en la S/E Limón (69kV). 117	
Figura 4. 53 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	118
Figura 4. 54 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	119
Figura 4. 55 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	119
Figura 4. 56 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	120
Figura 4. 57 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	120
Figura 4. 58 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	121
Figura 4. 59 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	121
Figura 4. 60 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	122
Figura 4. 61 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	122
Figura 4. 62 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012) ...	123



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 4. 63 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)	126
Figura 4. 64 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)	127
Figura 4. 65 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)	127
Figura 4. 66 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)	128
Figura 4. 67 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)	128
Figura 4. 68 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)	129
Figura 4. 69 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)	129
Figura 4. 70 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)	130
Figura 4. 71 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, 138kV-2012	131
Figura 4. 72 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012). 132	
Figura 4. 73 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012). 132	
Figura 4. 74 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012). 133	
Figura 4. 75 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012). 133	
Figura 4. 76 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012). 134	
Figura 4. 77 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012). 134	
Figura 4. 78 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012). 135	
Figura 4. 79 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012). 135	



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 4. 80 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012).	136
Figura 4. 81 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)	139
Figura 4. 82 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)	140
Figura 4. 83 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)	140
Figura 4. 84 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)	141
Figura 4. 85 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)	141
Figura 4. 86 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV).....	142
Figura 4. 87 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV).....	142
Figura 4. 88 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV).....	143
Figura 4. 89 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).	144
Figura 4. 90 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	145
Figura 4. 91 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	145
Figura 4. 92 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	146
Figura 4. 93 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	146
Figura 4. 94 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	147
Figura 4. 95 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	147
Figura 4. 96 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	148



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 4. 97 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	148
Figura 4. 98 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012)...	149
Figura 4. 99 Distribución Gaussiana de frecuencia de sobretensiones.....	152
Figura 4. 100 Diagrama en ATPDraw para la energización desde la subestación Cuenca Rayoloma.....	153
Figura 4. 101 Tensiones en las fases de la S/E Macas, cuando se produce la energización de la línea en vacío, desde la S/E Cuenca, 69kV (forma de onda característica de tensión, en la energización).....	154
Figura 4. 102 Diagrama en ATP de la energización de la línea desde la subestación Macas.....	156
Figura 4. 103 Onda normalizada de una descarga atmosférica	169
Figura 4. 104 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	170
Figura 4. 105 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	170
Figura 4. 106 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	171
Figura 4. 107 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	171
Figura 4. 108 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	172
Figura 4. 109 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	173
Figura 4. 110 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)	173
Figura 4. 111 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	174



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 4. 112 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	174
Figura 4. 113 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).....	175
Figura 4. 114 Comportamiento de la energía disipada en la fase A de la subestación Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)	176
Figura 4. 115 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	182
Figura 4. 116 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	183
Figura 4. 117 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	183
Figura 4. 118 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	184
Figura 4. 119 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	184
Figura 4. 120 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	185
Figura 4. 121 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	185
Figura 4. 122 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	186
Figura 4. 123 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	186
Figura 4. 124 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)	187



Figura B. 1 Curva característica tensión a.c. – tiempo (TOV).....	203
Figura B. 2 Características de operación del pararrayos	205
Figura C. 1 Ondas de tensión y corriente incidentes, reflejadas y transmitidas en líneas de impedancia Z1 y Z2	207
Figura C. 2 Resumen gráfico de las varias opciones de ondas de tensión. .	209
Figura D. 1 Carpeta comprimida con los archivos del programa ATPDraw ..	210
Figura D. 2 Archivos copiados en la carpeta ATPDRAW de la unidad C.....	210
Figura D. 3 Ventana de instalación del programa ATPDraw	211
Figura D. 4 Ventana de finalización de la instalación del programa.	212
Figura D. 5 Creación de la carpeta Atp.	212
Figura D. 6 Creación de la carpeta Grp.....	212
Figura D. 7 Ventana vacía del ATPDraw.	213
Figura D. 8 Ventana del ATPDraw con el ejemplo 1.	213
Figura D. 9 Ventana para editar comandos del ATPDraw	214
Figura D. 10 Ventana con los comandos editados del ATPDraw.....	215
Figura D. 11 Ventana de opciones del ATPDraw.....	215
Figura D. 12 Ventana de variables de entorno del sistema	216
Figura D. 13 Ventana de nueva variable del sistema.....	216
Figura E. 1 Ventana del ATPDraw con los elementos que se utilizan para la construcción del sistema	217
Figura E. 2 Ventana del ATPDraw con el diagrama de la línea Cuenca-Macas a 69kV	218
Figura E. 3 Ventana Plotxy/selección de datos, para observar los resultados gráficos.....	219
Figura E. 4 Tensiones en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma a 69kV	219
Figura E. 5 Corrientes en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma a 69kV.....	220
Figura E. 6 Ventana en Notepad con las variables máximas de salida	220



GLOSARIO DE ELEMENTOS



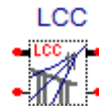
Fuente de Tensión de Thévenin trifásico



Equivalente de Thévenin en una barra



Interruptor estadístico monofásico



Línea de transmisión



Resistencia lineal



Inductancia lineal



Probador de Tensión



Pararrayos



Probador de Corriente



Transformador Trifásico



Fuente de corriente de impulso tipo rayo



CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia en condiciones transitorias pueden generar sobretensiones, sobrecorrientes, formas de onda anormales y transitorios electromecánicos.

Un transitorio eléctrico es un cambio súbito de las magnitudes de corriente y tensión originados por una manifestación externa (por ejemplo descarga atmosférica) o por una manifestación interna producida por un cambio repentino de condiciones del circuito, como cuando se abren o se cierran líneas o fallas ocurridas en el sistema.

El tiempo en que los sistemas pasan en condiciones transitorias es insignificante comparado con el tiempo en régimen permanente. Sin embargo, los períodos en que los sistemas pasan en condiciones transitorias son muy importantes, porque es en este período que los componentes del sistema atraviesan valores picos de corriente o de tensión.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Realizar las simulaciones de transitorios electromagnéticos de la línea Cuenca-Macas del sistema de subtransmisión de la CENTROSUR tanto a 69kV como a 138 kV (nivel de tensión de operación futura), utilizando el programa ATP.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Análisis de transitorios electromagnéticos y su incidencia en los sistemas eléctricos.
- Uso del programa Análisis de Transitorios Electromagnéticos (ATP) y modelación de los diferentes elementos para el análisis de transitorios electromagnéticos.
- Analizar los transitorios electromagnéticos que se suscitan en la línea Cuenca-Macas a consecuencia de maniobras, fallas y descargas atmosféricas.



1.3 ALCANCE

Analizar y calcular las sobretensiones temporales, de maniobra y de descargas atmosféricas en una línea de subtransmisión, haciendo uso del programa para análisis de transitorios electromagnéticos, ATP.

Se aplicará el modelo en la simulación de operación de la línea de subtransmisión Cuenca - Macas de 69 kV (condiciones actuales), y a 138 kV (condiciones futuras).

1.4 JUSTIFICACIÓN

En los sistemas de potencia, específicamente en líneas de transmisión, y subtransmisión se producen sobretensiones y sobrecorrientes al momento de su energización, maniobras, fallas y descargas atmosféricas causando daños en los equipos como transformadores, elementos de protección, capacitores, reactores y en las mismas líneas, por lo que es necesario estudiar estos componentes durante su energización, fallas, maniobras y descargas atmosféricas para definir una correcta operación y evitar en lo posible la presencia de estos eventos nocivos para los equipos.

La CENTROSUR cuenta con una línea de subtransmisión de aproximadamente 150km, con la cual sirve a las cargas situadas en la provincia de Morona Santiago y a su vez, evacua la potencia generada por la central HIDROABANICO, en el extremo de la línea. Desde la incorporación de esta central, se han producido eventos que han ocasionado daños en pararrayos afectando a los elementos asociados a la línea, cuyas causas no se han determinado.

En este sentido, el desarrollo del estudio planteado en esta tesis está enfocado a analizar el comportamiento de esta línea ante fenómenos transitorios. El estudio se efectuará por medio del programa computacional ATP (Alternative Transients Program) el cual es una herramienta para el análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología que se utilizará en el desarrollo del proyecto de tesis será de tipo investigativo, basándose en la recopilación de información a través de textos, tesis, páginas web, papers, normas, y otros medios de información afines al tema que se pretende desarrollar.



CAPITULO II: SOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP), en la mayor parte de tiempo operan en régimen permanente, sin embargo, deben ser diseñados para soportar condiciones desfavorables a los que pueden estar sometidos durante un período corto de tiempo. Los rayos y las operaciones de maniobra son siempre un potencial de peligro para los equipos, los cuales definen las condiciones de operación del sistema. En un SEP es muy común contar con la presencia de fenómenos transitorios, los cuales, son eventos indeseables y de naturaleza momentánea causados por diferentes circunstancias, los cuales provocan sobretensiones en todo el sistema alterando de esa manera su funcionamiento normal. En general, los transitorios en los sistemas eléctricos se originan debido a cualquier cambio repentino en las condiciones de operación o configuración de los sistemas.

2.1 DEFINICIÓN DE SOBRETENSIONES

Una sobretensión es una magnitud superior a la de referencia, el cual es el valor máximo nominal de operación del sistema, pueden ser, de origen externo provocados por las descargas atmosféricas, las cuales, pueden originar tensiones superiores al nominal; o de origen interno a frecuencia industrial y por maniobra; las sobretensiones de frecuencia industrial son poco amortiguados y se encuentran a frecuencia nominal o cerca de la misma y las sobretensiones debido a maniobra ocurren debido a la apertura y cierre de los disyuntores, los cuales, son muy frecuentes.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES

Muchas son las causas por las que se originan sobretensiones en una red de transmisión, es así que su clasificación se realiza de acuerdo a tres características importantes, las cuales son, su origen, su forma y su duración.

Las sobretensiones según su origen pueden clasificarse en [1]:

- a) Sobretensiones de origen interno



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Son los producidos al variar las condiciones de operación o servicio de la instalación; sus causas son múltiples, entre ellas tenemos, maniobras voluntarias sobre las redes, cortocircuitos, modificaciones bruscas del régimen de carga, descargas a tierra, efecto de resonancia, entre otras. Estas sobretensiones corresponden generalmente a un régimen transitorio de naturaleza oscilante.

b) Sobretensiones de origen externo

Son debidos a fenómenos atmosféricos, especialmente a las descargas atmosféricas (rayos) entre las nubes, entre nubes y tierra o entre nube y el conductor. Este tipo de descargas pueden ser directas o indirectas, según la incidencia del rayo, es decir, según el rayo caiga directamente sobre la línea de transmisión o en las proximidades de la misma, respectivamente.

La clasificación de las sobretensiones según su forma y duración, de acuerdo a la Norma IEC 60071 – 1 [2] es la siguiente:

- a) Tensión de frecuencia industrial permanente
- b) Sobretensiones temporales
- c) Sobretensiones transitorias
 - Sobretensiones de frente lento
 - Sobretensiones de frente rápido
 - Sobretensiones de frente muy rápido
- c) Sobretensión combinado

La forma de clasificación de las sobretensiones, en ambos casos, guarda concordancia una con otra, pero, cabe mencionar que estas dos clasificaciones anteriores se las puede agrupar en una sola, cuya clasificación es:

- a) Sobretensiones a frecuencia industrial
- b) Sobretensiones por maniobra, y
- c) Sobretensiones por descargas atmosféricas

Sus correspondencias con las dos formas de clasificación de las sobretensiones mencionadas anteriormente se las resumen en la siguiente tabla:



Cuadro 2. 1 Correspondencia de la clasificación de las sobretensiones.

	Correspondencia entre la clasificación de las Sobretensiones	
	Según su origen	Según su forma y duración
Sobretensiones a frecuencia industrial	Interno	Sobretensión temporales
Sobretensiones por maniobras	Interno	Sobretensión transitorio de frente lento
Sobretensiones por descargas atmosféricas	Externo	Sobretensión transitorio de frente rápido

Fuente: Elaboración del autor en base a la International estándar IEC 60071-1, Insulation Co-ordination Part 1: Definition, principles and rules. Seventh Edition, 1993-12 [2], Pág. 21.

2.3 FORMAS DE ONDA NORMALIZADAS DE SOBRETENSIONES

Frente a los diferentes tipos de sobretensiones, se han establecido [2] formas de onda normalizadas, cuyo detalle se encuentra en el cuadro 2.2; así tenemos:

- *Tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial.*- es una tensión sinusoidal, de frecuencia comprendida entre 48 Hz y 62 Hz, y una duración igual a 60 segundos.
- *Impulso de tensión tipo maniobra normalizada.*- es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 250 μ s y un tiempo de cola de 2500 μ s.
- *Impulso de tensión tipo rayo normalizado.*- es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 1,2 μ s y un tiempo de cola de 50 μ s.
- *Impulso de tensión tipo maniobra combinado normalizado.*- es un impulso de tensión combinado que tiene dos componentes del mismo valor de cresta y polaridad opuesta, la componente positiva es un impulso de maniobra normalizado, mientras que la componente negativa es un impulso de maniobra cuyos tiempos de subida y de cola no deberían ser inferiores a los de impulso positivo. Ambos impulsos deberían alcanzar el valor de cresta en el mismo instante. El valor de cresta de la tensión combinada es, por tanto, la suma de los valores de cresta de los componentes.



Como se puede apreciar, las sobretensiones se los puede clasificar de varias formas, en este capítulo, describiremos a las sobretensiones según su forma y duración, es decir, según la clasificación propuesta por la Norma IEC 60071 – 1 [2], así como también trataremos las causas que la originan, cuya finalidad será adquirir un panorama más amplio de los tipos de sobretensiones, pero antes, en el cuadro 2.2 se presentan las formas de sobretensiones representativas y sus parámetros de cada uno de las sobretensiones presentadas según la norma antes mencionada.



Cuadro 2. 2 Clases, formas de onda y rango de parámetros de tensiones y sobretensiones

Clases de sobrevoltajes	Baja Frecuencia		Transitorios		
	Permanente	Temporal	Frente lento	Frente Rápido	Frente Muy Rápido
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Rango de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f=50 \text{ Hz ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ ms}$	$3 \text{ ns} < T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Parámetros de voltaje estandarizado	$f=50 \text{ Hz ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t (*)$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	(*)
Ensayo de voltaje tolerado normalizado	(*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de impulso tipo maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo	(*)
(*) a especificar por el comité del producto considerado					

Fuentes: International standard IEC 60071-1, Insulation Co-ordination Part 1: Definition, principles and rules. Seventh Edition, 1993-12 [2], Pág. 41.



2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE SOBRETENSIONES

2.4.1 Tensión de frecuencia industrial permanente

Es la tensión del sistema que se origina en condiciones normales de operación, tienen variaciones mínimas en magnitud y difieren de un punto a otro dentro del sistema. Su frecuencia oscila igual o muy cerca de la frecuencia de operación del sistema, 60 Hz en nuestro país.

Bajo propósitos de diseño y coordinación de aislamiento la tensión de frecuencia industrial podrá ser considerada como constante e igual que la tensión más alta del sistema [3].

2.4.2 Sobretensiones temporales

La sobretensión temporal o sobretensión de frecuencia industrial es de duración relativamente larga, no permanente; puede ser, no amortiguada o débilmente amortiguada y en algunos casos su frecuencia puede ser varias veces menor o mayor que la frecuencia industrial. Aunque la amplitud de estas sobretensiones es menor que otros tipos de sobretensiones, puede ser determinante en el diseño del aislamiento interno como también en el aislamiento externo de los equipos. Este tipo de sobretensión también es conocida como sobretensión sostenida, y persisten en el sistema hasta que sea modificado o que se elimine la causa que lo originó.

Generalmente las sobretensiones temporales son causadas por [4]:

- Maniobras, por ejemplo, rechazo de carga
- Fallas eléctricas, por ejemplo, corto circuito monofásico
- Fenómenos no lineales, por ejemplo, ferro – resonancia

Las sobretensiones temporales pueden ser caracterizadas por:

- Su amplitud, en general, inferior a 1,5 p.u.
- Su frecuencia de oscilación, puede ser menor, igual o mayor que la frecuencia fundamental.
- Su tiempo de duración total, es superior a decenas de milisegundos.



2.4.3 Sobretensiones transitorias

Las Sobretensiones transitorias son sobretensiones de corta duración, algunos milisegundos o menores, pueden ser oscilatorias o no oscilatorias y generalmente muy amortiguadas y pueden ser seguidas inmediatamente por sobretensiones temporales, en tales casos, las dos sobretensiones son consideradas como eventos independientes. Las sobretensiones transitorias se dividen en:

2.4.3.1 Sobretensión transitoria de frente lento

Son sobretensiones usualmente unidireccionales, con un tiempo, hasta la cresta comprendida entre 20 μ s y 500 μ s y un tiempo de cola menor o igual a 20ms. Estas sobretensiones pueden originarse de fallas, operaciones de conexión o desconexión de equipos pertenecientes al SEP y descargas atmosféricas.

2.4.3.2 Sobretensión transitoria de frente rápido

Son sobretensiones usualmente unidireccionales, con un tiempo hasta la cresta comprendido entre 0.1 μ s y 20 μ s y un tiempo de cola menor o igual a 300 μ s. Estas sobretensiones pueden originarse de operaciones de conexión o desconexión de equipos eléctricos, descargas atmosféricas o fallas.

2.4.3.3 Sobretensión transitoria de frente muy rápido

Son sobretensiones usualmente unidireccionales, con un tiempo hasta la cresta menor a 0.1 μ s con una duración total de 3ms y con oscilaciones superpuestas de frecuencia comprendidas entre 30 kHz y 100 MHz. Estas sobretensiones pueden originarse por fallas u operaciones de conexión y desconexión de subestaciones aisladas en gas (GIS).

2.4.4 Sobretensión combinada

Corresponden a la unión de sobretensiones temporales y sobretensiones transitorias, consiste en dos componentes de tensión aplicadas simultáneamente a cada uno de los dos terminales de fase de una aislación fase – fase, o longitudinal, y tierra.

Se clasifican según la componente de mayor valor de cresta.

2.5 ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE SOBRETENSIONES TEMPORALES O DE FRECUENCIA INDUSTRIAL



Las sobretensiones temporales son de larga duración, desde 20 milisegundos hasta varios segundos, se caracteriza por su amplitud, su forma de onda y su duración.

Este tipo de sobretensiones suelen ser de origen interno, a continuación se explica las principales causas que los originan procurando caracterizarlas en relación a su frecuencia de oscilación [4].

2.5.1 Fallas a tierra

La falla más frecuente en un sistema eléctrico de potencia es la falla monofásica, la cual, puede ser originada por descargas atmosféricas o bien por el contacto entre los conductores y las estructuras aterrizadas. Cabe mencionar, que las fallas bifásicas y trifásicas con o sin presencia de tierra no son muy frecuentes.

En una falla monofásica las fases sanas experimentan una elevación de tensión respecto a tierra cuyo valor depende principalmente del grado de puesta a tierra del sistema en el punto en cuestión. La puesta a tierra de un sistema eléctrico de potencia se lo puede realizar de dos formas diferentes, sistemas eléctricos de potencia efectivamente puestos a tierra y sistemas eléctricos de potencia no-efectivamente puestos a tierra. En el primer caso, bajo condiciones de falla, se tiene una tensión de fase sana-tierra menor que el 80% de la tensión línea-línea sin falla, conforme se puede observar en la figura 2.1, siendo; $R_1 = R_2 = 0,1X_1$ y $X_1 = X_2$.

En el caso de un sistema efectivamente puesto a tierra se cumple que la relación entre la reactancia de secuencia cero y la reactancia de secuencia positiva es inferior o igual a tres, $0 \leq X_0/X_1 \leq 3$ y una relación entre resistencias de secuencia cero y reactancia de secuencia positiva inferior a uno, $R_0/X_1 < 1$.

En el caso de tener sistemas eléctricos de potencia no-efectivamente puestos a tierra se tienen tensiones fase-tierra sobre el 80% pero usualmente bajo el 100% de la tensión entre fases [4].

Para sistemas con neutro aislado, en caso de ocurrir una falla a tierra las tensiones de fase-tierra en las fases sanas podrían alcanzar la tensión línea-línea o incluso excederlas, es decir, superar valores de 1.73 p.u.

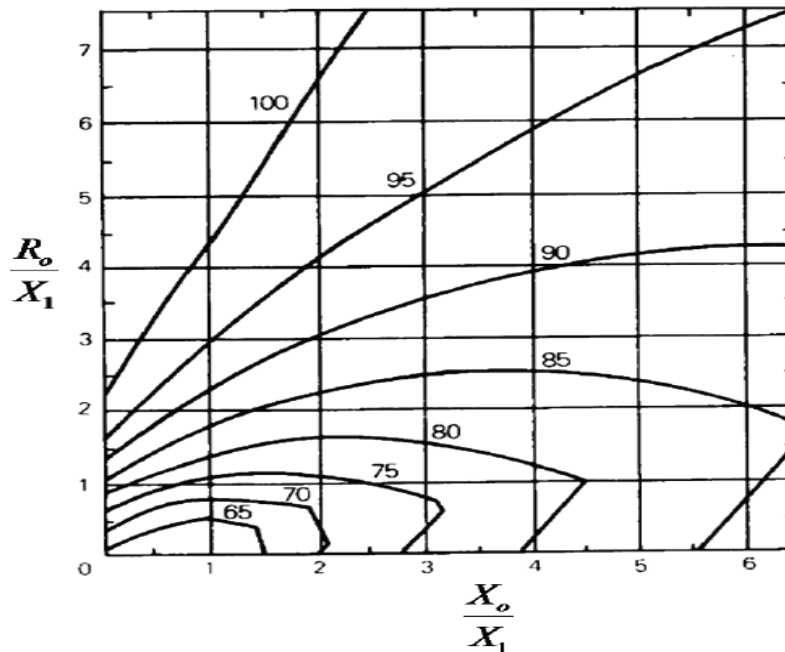


Figura 2. 1 Máximos valores de sobretensiones temporales debido a ocurrencias de fallas en función de la resistencia del sistema

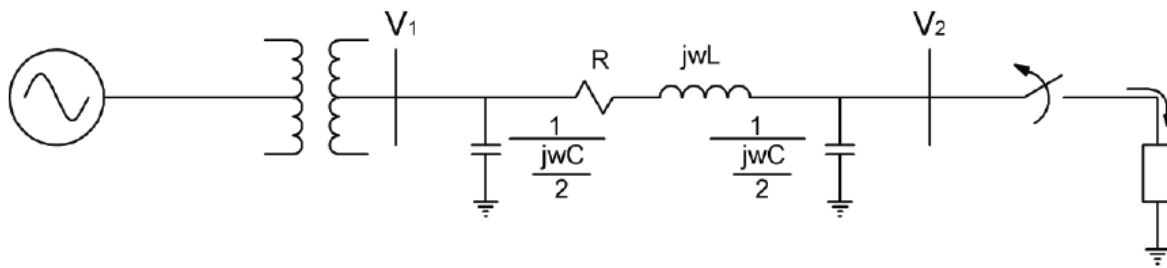
Fuente: Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Elétricas S.A., Brasil, 1987 [4], Pág. 41.

La magnitud de este tipo de sobretensiones depende del factor de falla a tierra, el cual, guarda dependencia con las características del sistema y del tipo de conexión a tierra del neutro; este factor se lo calcula a través de las impedancias de secuencia de fase, lo cual, refleja una relación entre un valor máximo eficaz de tensión fase-tierra a frecuencia industrial de una fase no afectada durante una falla y un valor de tensión fase-tierra a frecuencia industrial en el mismo punto, con la falla despejada, el valor del factor de falla a tierra es independiente del valor real de operación del sistema en el lugar considerado [4].

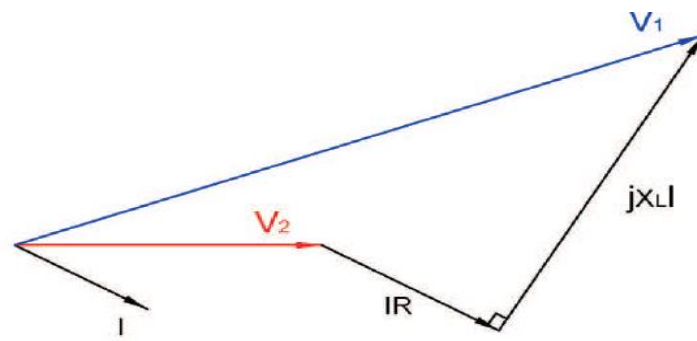
2.5.2 Rechazo de carga

Una pérdida súbita de carga produce una elevación de tensión a lo largo de todo el sistema debido a la reducción del flujo de corriente, el cual, provoca que se incremente el efecto capacitivo de las líneas y que la caída de tensión en la impedancia se reduzca. Además, los generadores previo al rechazo de carga, por lo general se encuentran suministrando energía a cargas inductivas por lo que se encuentran operando sobreexcitados, esto se puede visualizar mejor en la figura 2.2 considerando que la tensión interna del generador permanece constante en el instante siguiente al rechazo de carga. El objetivo del estudio del rechazo de carga es determinar los esfuerzos de tensión impuestos a los equipos y analizar las

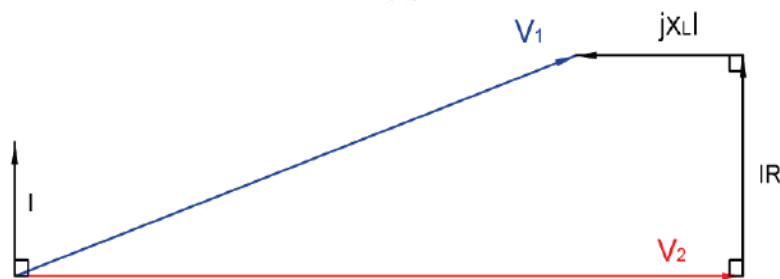
medidas correctivas y operativas cuando ocurra una pérdida repentina de carga en el sistema.



(a)



(b)



(c)

Figura 2. 2 (a) Rechazo de carga en un sistema radial, (b) Diagrama fasorial antes del rechazo de carga, (c) Diagrama fasorial después del rechazo de carga

Fuente: Transitórios Eléctricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Eléctricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Eléctricas S.A., Brasil, 1987 [4], Pág. 43.

2.5.3 Efecto Ferranti

El fenómeno conocido como efecto Ferranti es un aumento de tensión en el extremo receptor de una línea de transmisión que se produce por el efecto capacitivo que tienen las líneas aisladas entre si y aisladas a tierra. Estas desde el



punto de vista eléctrico son equivalentes a las armaduras de un condensador y cuando están a potenciales distintos, toman una carga eléctrica dependiente de los valores de dichos potenciales entre si y respecto a tierra. Al variar estos potenciales constantemente originan una corriente transversal que se suma a la corriente de la línea aumentando los valores de tensión en el extremo receptor. [5] La forma de onda de la sobretensión resultante de este fenómeno es por lo general senoidal a frecuencia industrial.

2.5.4 Resonancia y Ferroresonancia

La ferroresonancia es un fenómeno de resonancia no lineal que afecta a las redes eléctricas, se produce por la interacción de las capacitancias distribuidas en las redes eléctricas y las inductancias no lineales construidas sobre núcleos ferromagnéticos, la ferroresonancia al depender de la variabilidad de la inductancia (L), puede producirse en una banda ancha de frecuencia. Para la existencia de ferroresonancia el sistema debe reunir tres condiciones necesarias, pero no suficientes, las cuales son:

- Conexión simultánea de condensadores y bobinas de inductancia no lineal.
- Existencia dentro de la red al menos un punto cuyo potencial no es fijo.
- Componentes de la red poco cargados (transformadores de potencia o transformadores de potencial en vacío) o fuentes de pequeña potencia de cortocircuito (alternadores).

Si no se verifica alguna de estas condiciones, la ferroresonancia es muy poco probable que se produzca.

A continuación se menciona algunas situaciones en las cuales se produce resonancia y ferroresonancia [4]:

a) Ocurre resonancia:

- Entre líneas eléctricas de elevada capacitancia y reactores limitadores de corriente.
- Entre una inductancia lineal y la capacitancia de un sistema eléctrico constituido por una línea de transmisión levemente cargada.

b) Ocurre ferroresonancia:

- Entre la reactancia de transformadores y la capacitancia entre bobinas de un transformador de distribución.
- En sistemas eléctricos que contienen elementos saturables y filtros de armónicos.



Las sobretensiones temporales producidos por ferroresonancia se deben evitar y limitar, no se deben considerar como base para la elección del nivel de tensión de un pararrayos o para el diseño de aislamiento [3]. Esto significa, en el procedimiento de coordinación de aislamiento no se considera los niveles de sobretensiones debidas a la ferroresonancia y por lo tanto los pararrayos, cuya tensión residual es en general mucho mayor que las sobretensiones debido a la ferroresonancia, no constituyen una protección contra este fenómeno.

2.5.5 Combinación de sobretensiones temporales

La presencia de sobretensiones temporales son generalmente combinadas, la combinación de fallas a tierra con rechazo de carga es típica y puede existir durante una falla en una línea, en la cual, el interruptor de carga abre primero y la carga desconectada provoca una sobretensión por pérdida de carga en la parte de la red todavía en defecto, hasta que se abra el interruptor de cabecera. La combinación falla a tierra con rechazo de carga puede existir también cuando se desconecta una gran carga y la sobretensión temporal producida por esta causa provocará una falla a tierra en el resto de la red. La probabilidad de que suceda esto es pequeña cuando las sobretensiones debidas al cambio de carga son en sí mismas pequeñas. Un defecto consecutivo a una pérdida de carga solo se puede producir en condiciones extremas, por ejemplo, en el caso de una fuerte contaminación.

Estas combinaciones pueden conducir a la elección de pararrayos con características asignadas mayores y en consecuencia niveles más altos de protección y de aislamiento, todo esto se justifica técnica y económicamente si la probabilidad de que ocurran simultáneamente es muy elevada.

2.6 ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DE FRENTE LENTO O POR MANIOBRA

Las sobretensiones transitorias de frente lento o más conocidas como sobretensiones por maniobras son originadas principalmente por los siguientes motivos, la operación de los disyuntores en las subestaciones, la aparición de fallas en el sistema eléctrico y la ocurrencia de descargas atmosféricas en puntos alejados cuyos parámetros característicos, tales como, su amplitud y duración dependen de los parámetros del sistema, de su configuración y condiciones en que ellos se encuentren al momento de realizar la operación de maniobra; así



como, el valor máximo de este tipo de sobretensión causada por una maniobra de energización es decir depende del instante en el que se realiza dicha maniobra.

La influencia de sobretensiones por maniobra aumenta según se incremente el nivel de tensión de la red; su estudio se lo debe realizar en régimen transitorio, lo que requiere de medios adecuados dado el tamaño de los sistemas eléctricos de potencia y la complejidad de los modelos matemáticos empleados para representar los componentes del sistema, dichos estudios antes del desarrollo de los paquetes computacionales se los realizaba mediante Analizadores Analógicos (TNA), ahora en la actualidad se los realiza mediante la ayuda de programas que permitan analizar transitorios en redes eléctricas, uno de los más conocidos es el Alternative Transient Program (ATP), él cual, será de gran ayuda en nuestro estudio; a continuación, se presenta las principales causas de la aparición de sobretensiones de maniobra y con ello tener un panorama más amplio del tema en cuestión.

2.6.1 Energización y recierre de líneas de transmisión

Estas operaciones de maniobra son las más comunes en los sistemas eléctricos de potencia y su análisis puede ser realizado considerando tres periodos distintos. El primero, es un periodo transitorio, en el cual, prevalecen los efectos de las ondas viajeras cuya duración depende de la longitud de la línea de transmisión en la que se realice la operación de maniobra, este tiempo por lo general está en el orden de milisegundos. El segundo, es un periodo dinámico, que está entre el periodo transitorio y el régimen permanente, siendo de naturaleza repetitiva y caracterizada por las pequeñas variaciones en la forma de onda que es aproximadamente periódica y compuesta por la tensión a frecuencia fundamental y por los armónicos de bajo orden, especialmente, armónicos de segundo y tercer orden, este periodo puede tener una duración de hasta un segundo. Finalmente el tercer periodo, es el de régimen permanente, en el cual, la tensión es periódica pero puede ser muy distorsionado, generalmente en este periodo las sobretensiones ocurren cuando el terminal receptor de la línea de transmisión está abierto, como en el caso de energización y recierre, este tipo de sobretensiones pueden persistir durante varios minutos.

Las sobretensiones debido a maniobras de energización y recierre dependen de las condiciones del sistema, siendo las más importantes [4]:

- a) Potencia de cortocircuito del sistema alimentado.
- b) Punto de la onda de tensión en el cual se cierra el disyuntor.



- c) Grado de compensación de la línea de transmisión.
- d) Longitud de la línea de transmisión.
- e) Pérdidas en el conductor.
- f) Presencia de equipos de protección.
- g) Grado de puesta a tierra del sistema.
- h) Tensión antes de la maniobra.
- i) Valor de la resistencia de preinserción.
- j) Tiempo de inserción de la resistencia.
- k) Dispersión entre los contactos del disyuntor.
- l) Valor de la carga residual en la línea para el caso de cierre.

2.6.1.1 Energización de líneas de transmisión

Las sobretensiones por energización de una línea de transmisión dependen de la tensión en cada fase del sistema sobre las cuales los polos del interruptor cierran; luego de que la primera fase es cerrada se tiene ondas viajeras en las demás fases debido al acoplamiento que existen entre ellas, estas ondas de tensión se propagan por la línea, las cuales, se reflejan en los terminales abiertos donde ocurren las mayores sobretensiones.

En la siguiente gráfica se puede apreciar los oscilogramas de las tensiones producidas al inicio y al final de la línea de transmisión, al ser energizada por una fuente infinita y por una fuente inductiva, además, se puede observar un aumento exponencial de la tensión de frente lento con una constante de tiempo determinada por la inductancia de la fuente y por la impedancia de sobretensión de la línea, este aumento exponencial inicial también ocurre al final de la línea. Las múltiples reflexiones producen cambios en las formas de onda, los intervalos en los que se producen estos cambios son determinados por la segunda constante de tiempo, es decir, por el tiempo de propagación de la línea.

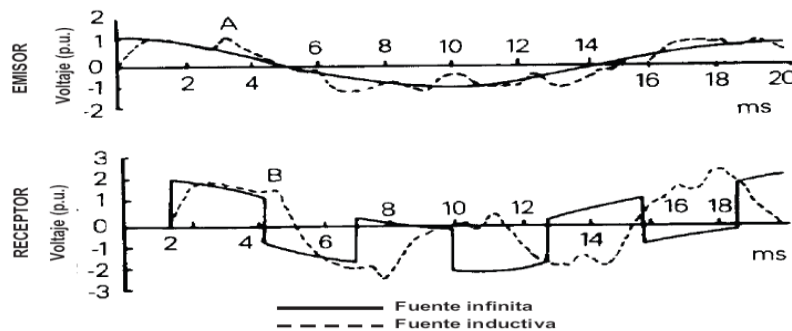


Figura 2. 3 Transitorios de energización de líneas

Fuente: Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Elétricas S.A., Brasil, 1987 [4], Pág. 74.



El pico “A” de tensión que se observa en el gráfico al inicio de la línea de transmisión se debe a la primera reflexión de la onda producido al final de la línea y cuya reflexión permite que la onda de tensión arribe al inicio de la línea y se encuentre con la inductancia de la fuente. Este pico a su vez es transmitido hacia el final de la línea y aparece en el extremo receptor como un pico de tensión igual a “B”. Después de esto, debido a las varias reflexiones, estos picos de tensión reaparecen en formas de onda en intervalos iguales a dos veces el tiempo de propagación de la línea de transmisión y entre los mencionados intervalos ocurren nuevos cambios exponenciales. Todo esto se superpone a la tensión de frente lento, constituyendo así una tercera constante de tiempo.

Las sobretensiones debidas a energización son mayores en virtud del acoplamiento mutuo entre las tres fases y el hecho de que los tres polos del disyuntor no se cierran simultáneamente.

2.6.1.2 Recierre de líneas de transmisión

Cuando un interruptor opera para desconectar una línea en vacío, la corriente capacitiva de la línea es interrumpida cuando dicha corriente pasa por cero y cuando esto sucede la tensión está pasando por su valor máximo, dejando consecuentemente una carga residual en la línea, la misma que no es igual en las tres fases debido al acoplamiento existente entre ellas. Este acoplamiento y el desplazamiento del neutro dejan en la fase que primero se interrumpe la corriente una tensión de hasta un valor de 1.3 p.u. y a menos de que esta carga sea drenada por un transformador o un reactor, permanecerá en la línea mucho tiempo. [5]

Si la línea es reconectada antes de haber sido drenada la carga residual y se mandara a cerrar los polos del interruptor cuando la tensión del sistema estuviera con polaridad opuesta a la de la línea, la diferencia entre los valores de tensión con y sin carga residual es muy grande; consecuentemente, la sobretensión transitoria también será mucho mayor. En líneas trifásicas, sobretensiones de este tipo pueden alcanzar hasta 5.0 p.u. [5]

La disminución de la carga de una línea en vacío, cuando no existen equipamientos especiales, es muy lenta, y depende de las condiciones climáticas. De esta forma, una línea se mantiene cargada prácticamente con su tensión máxima por un largo período después de la interrupción de la corriente, este tiempo es en el orden de los 2 a 5 minutos para la descarga total de la línea,

pudiendo alcanzar los 15 minutos en condiciones ambientales muy secas, es decir, bastante superior al tiempo muerto utilizado en los esquemas de reconexión que se sitúa en el orden de los 30 ciclos.

En la Figura 2.4 se indican las sobretensiones resultantes de una operación de reconexión antes mencionadas.

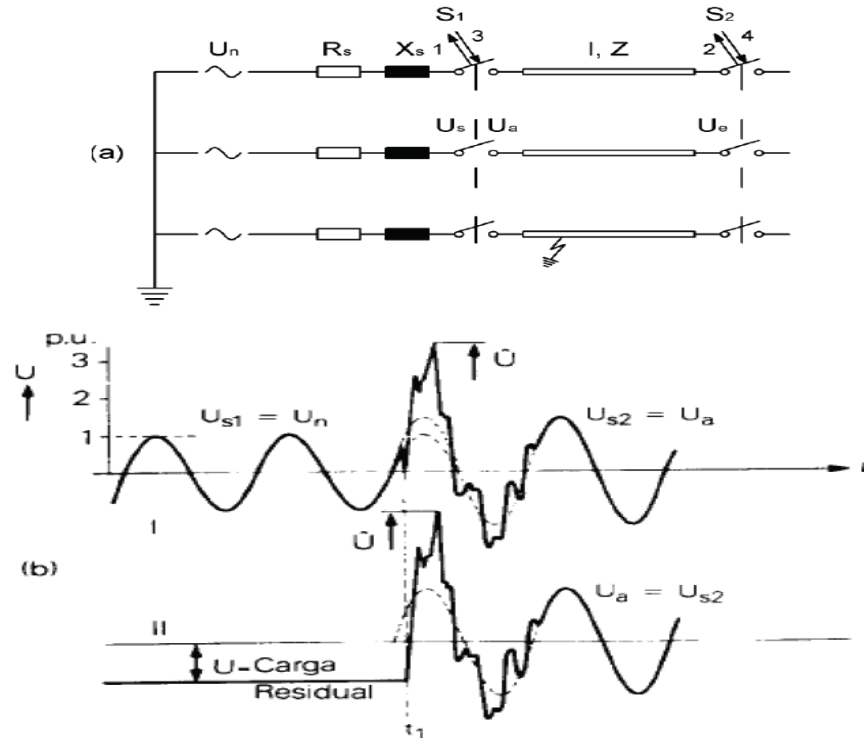


Figura 2. 4 Diagrama y Formas de Ondas Básicas para la tensión en una maniobra de reconexión.

Fuente: Transitórios Eléctricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Eléctricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Eléctricas S.A., Brasil, 1987 [4], Pág. 74.

El tiempo de descarga de la línea puede ser modificado en caso de que el interruptor haya tenido acoplados resistores de pre inserción, reactores en derivación o transformadores de potencial inductivo conectados a la línea. En cuanto al efecto de la resistencia de pre inserción, depende básicamente del valor del resistor, de su tiempo de inserción y de la longitud de la línea.

Cuando una línea es compensada por un reactor en derivación, el comportamiento de la carga residual retenida en las capacitancias de la línea asume una forma oscilatoria, en general con una composición de frecuencias, que depende del nivel de compensación paralela. La forma de onda posee un amortiguamiento en su magnitud en el tiempo, dependiente del factor de calidad del reactor.

Se producen sobretensiones transitorias también cuando una línea es desenergizada. Un ejemplo de desenergización de una línea que termina con un transformador se muestra en la Figura 2.5, donde se puede observar que la tensión alcanza valores aproximados a 1.5 p.u. y la forma de onda presenta un aspecto rectangular por causa del efecto de la saturación del transformador.

Los tiempos t_a , t_b , t_c , son los instantes en los que se produce la apertura de los interruptores para cada fase.

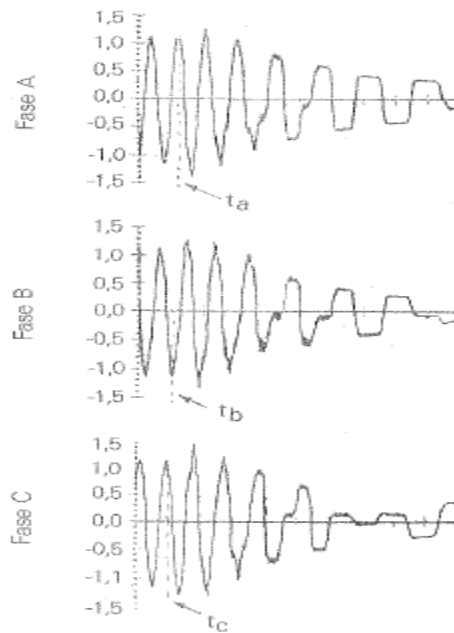


Figura 2. 5 Sobretensiones producidas cuando es desenergizada una línea terminada en un transformador.

Fuente: D'AJUZ, Ary. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento-aplicação em sistemas de potencia de alta tensão. Rio de Janeiro. FURNAS. Niterói, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF, 1987 [5].

2.6.2 Maniobras de capacitores y reactores

Cualquier sistema eléctrico de potencia se encuentra constituido normalmente por parámetros, tales como, Resistencia (R), Inductancia (L) y Capacitancia (C) en mayor o menor proporción. Los parámetros de inductancia y capacitancia son caracterizados por su habilidad de almacenar energía, en el caso del inductor almacena energía en forma de campo magnético, en cambio el capacitor almacena energía en forma de campo eléctrico.

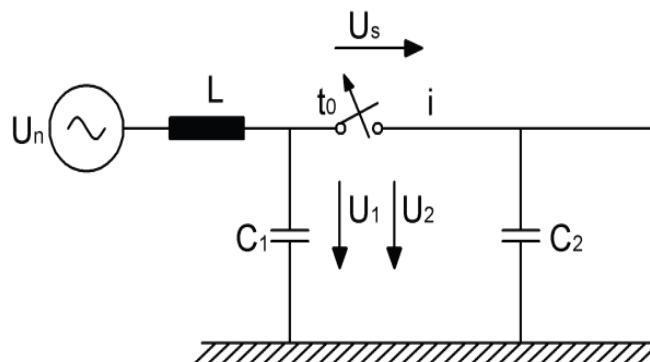


Se pueden desarrollar tensiones elevadas al realizar maniobras tanto de capacitores y reactores, debido a que puede ocurrir el fenómeno de reencendido del arco eléctrico en los contactos del disyuntor. Generalmente, en este tipo de maniobras implica el fenómeno de almacenamiento de energía en la inductancia y capacitancia, con un intercambio entre ambos.

2.6.2.1 Circuitos capacitivos

Después de las resistencias, los condensadores suelen ser los elementos más comunes en un circuito, el cual, es un elemento de dos terminales diseñado para almacenar energía en forma de campo eléctrico. Es así, para su explicación se basa en la figura 2.6 que se presenta a continuación, en la cual, se observa que una carga capacitiva está alimentada por una fuente inductiva, por lo que se tiene que la corriente está adelantada 90° con respecto a la tensión.

En el punto 1, indicado en la figura 2.6, se produce la apertura de los contactos del disyuntor y un arco eléctrico entre los mismos, a pesar de esto, la corriente sigue fluyendo hasta pasar por cero donde pierde su conductividad. Cuando la corriente es completamente interrumpida en el punto 2, ocurre una pequeña oscilación de tensión debido a la igualación de energía entre la inductancia de la fuente (L) y las capacitancias parásitas (C_1), en este caso no sucede el reencendido del arco ya que la diferencia de potencial que hay en el disyuntor, $U_2 - U_1$, es muy pequeña, además el capacitor permanece cargado con la tensión máxima de la fuente. Cuando la tensión de la fuente cambia de polaridad la diferencia de potencial existente en los polos del disyuntor comienza a aumentar, al momento en que la tensión alcance el valor pico de -1 p.u., la diferencia de potencial en los polos del disyuntor llegará a 2.0 p.u. y si el disyuntor no ha obtenido suficiente rigidez dieléctrica se produce un reencendido del arco como se puede observar en el punto 3.



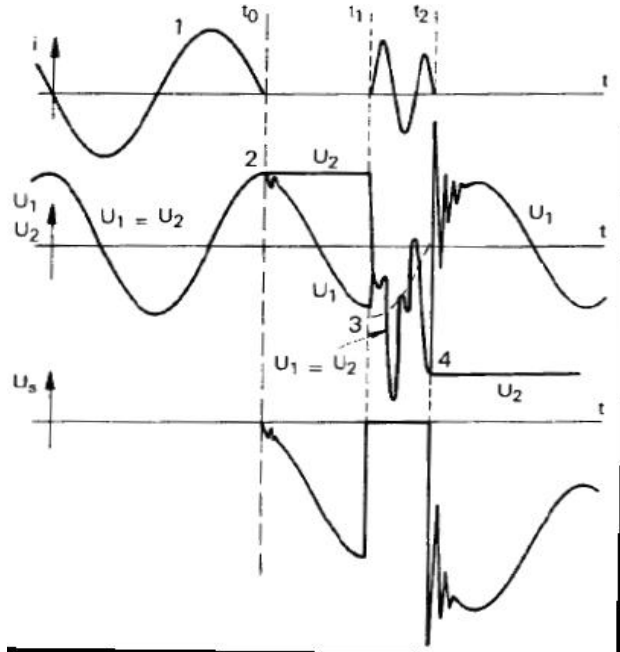


Figura 2. 6 Apertura de un circuito capacitivo

Fuente: Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Elétricas S.A., Brasil, 1987 [4], Pág. 80.

Cuando la tensión en el capacitor alcanza su valor máximo en el punto 4, una corriente transitoria pasará nuevamente por cero y el arco eléctrico se extinguirá nuevamente, dejando al capacitor cargado con una tensión más alta.

2.6.2.2 Circuitos inductivos

En la desconexión de circuitos inductivos se presentan transitorios que provocan sobretensiones en las instalaciones, este tipo de transitorios pueden ser muy graves, en particular si en los circuitos inductivos circulan corrientes pequeñas. Este caso corresponde en la práctica normalmente a la desconexión de transformadores de alta tensión en vacío.

En la Figura 2.7 se muestra un circuito con un inductor L_2 en paralelo con una capacitancia C_2 . Analizaremos el caso en el que la corriente que circula por el interruptor predomina aquella corriente que circula por L_2 y está retrasada a la tensión en 90° , además se toma en cuenta que el valor de la inductancia L_F es menor que el de L_2 y que los contactos del disyuntor se separan antes del instante t , consecuentemente, la corriente I será conducida a través del arco establecido entre los contactos. Cuando la corriente pasa por cero, el arco se extingue y como el circuito es inductivo, esto ocurrirá cuando U_1 y U_2 están en sus máximos.

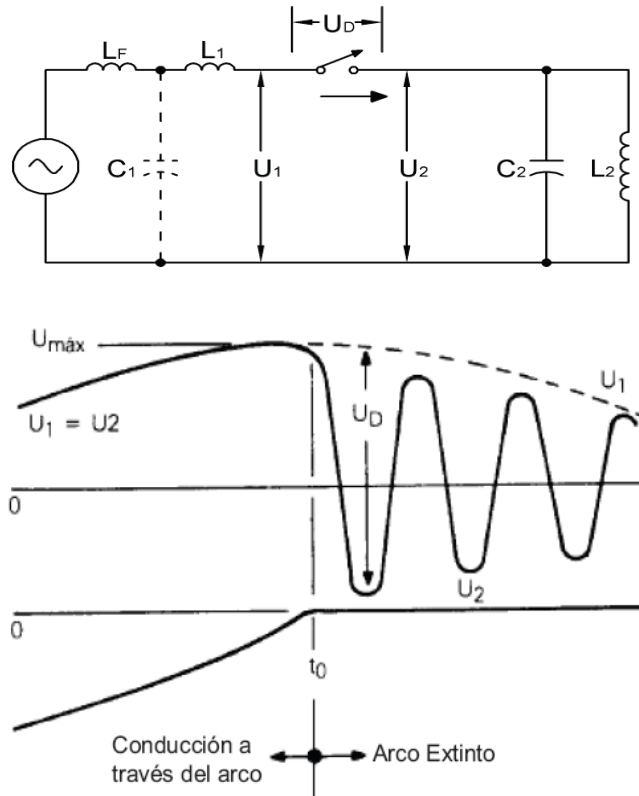


Figura 2. 7 Apertura de un circuito inductivo

Fuente: Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Elétricas S.A., Brasil, 1987 [4], Pág. 82.

En este caso, si el arco se extingue y permanece así, habrá una oscilación de la tensión U_2 debido al cambio de energía C_2 y L_2 . La frecuencia de esta oscilación está dada por L_2 y C_2 y es generalmente mayor a la frecuencia de la fuente. La tensión de restablecimiento a través del disyuntor U_D crece rápidamente para su valor máximo siendo esta situación muy diferente del caso analizado anteriormente, en el cual transcurre medio ciclo antes de que la tensión de restablecimiento haya alcanzado su máximo.

En la práctica, la tensión de restablecimiento es influenciada por las oscilaciones que ocurren en la tensión U_1 cuando el arco se extingue. Estas oscilaciones son debidas a L_1 y C_1 .

Como la tensión de restablecimiento U_D es aplicada a través de los contactos del disyuntor luego de que el arco se haya extinguido, se puede entonces establecer condiciones en que el arco se encienda nuevamente. Si hubiera una reconexión como en la Figura 2.8, la tensión U_2 en la carga intentará alcanzar o asumir la tensión de la fuente U_1 . Corrientes oscilatorias en la carga pueden alcanzar valores mayores que U_1 . Como la corriente de arco cruza por cero, este puede

nuevamente extinguirse en t_1 y la tensión de restablecimiento será nuevamente determinada por L_2 y C_2 . Este proceso puede repetirse por muchas veces con varias reconexiones, haciendo que la tensión U_2 aumente considerablemente.

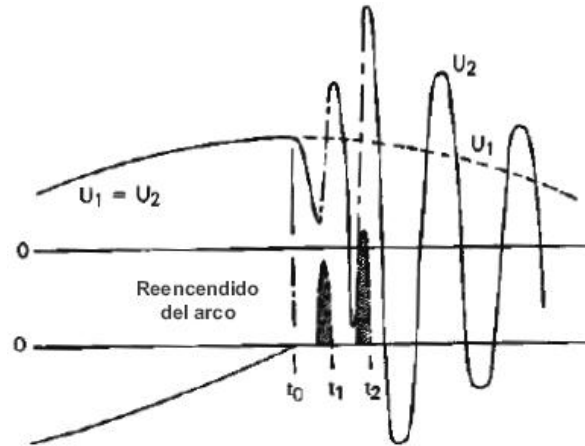


Figura 2. 8 Reconexión y aumento de la tensión de circuitos inductivos

Fuente: Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Elétricas S.A., Brasil, 1987 [4], Pág. 83.

Hay que recalcar que el arco se extingue cuando la corriente en el inductor pasa por cero. Así, toda la energía será inicialmente almacenada en el capacitor, luego el mecanismo fundamental por el cual la tensión comienza a aumentar es entonces un fenómeno capacitivo.

2.6.3 Rechazo de carga

Debido al rechazo de carga se produce dos tipos de sobretensiones, transitorias y sostenidas, las sobretensiones transitorias se produce en los primeros ciclos subsecuentes al rechazo de carga, en cambio, la sobretensión sostenida permanece en el sistema, normalmente, con distorsiones armónicas provocadas por la saturación de elementos no lineales del sistema.

El transitorio inicial, que ocurre en el instante de la apertura del disyuntor está en el orden de 1 a 2 ciclos y tiene la forma de onda de una sobretensión de maniobra. El valor de esta sobretensión por lo general no es superior a los obtenidos en los transitorios debidos a la energización y al recierre de la línea de transmisión.

Los disyuntorres pueden también ser substancialmente influenciados por las sobretensiones provocadas por el rechazo de carga. El primer disyuntor a ser maniobrado, es decir, aquel que interrumpe la corriente de carga, se encuentra en



una condición de operación normal y por lo tanto no requiere mayor cuidado. Por otro lado el disyuntor del otro extremo de la línea interrumpirá una corriente capacitiva en niveles elevados de tensión y frecuencia.

En conclusión, todos los equipos del sistema deben ser capaces de soportar las sobretensiones que ocurren durante un rechazo de carga y equipos, tales como, pararrayos y disyuntores deben ser especificados de tal forma que su daño no ocurra por la presencia de este tipo de sobretensiones.

2.7 ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DE FRENTE RÁPIDO O POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Las sobretensiones transitorias de frente rápido se caracterizan por ser sobretensiones de duración muy corta, varios microsegundos y que normalmente llevan picos de tensión superiores a la tensión máxima de operación de la red.

La causa principal y más frecuente de este tipo de sobretensiones en líneas de transmisión es el rayo, a pesar de que también puede originarse como consecuencia de maniobras en situaciones en las que las distancias entre los equipos y el interruptor son más cortas.

2.7.1 Sobretensiones originadas por descargas atmosféricas

Las sobretensiones transitorias de frente rápido producidas por descargas atmosféricas son de origen externo, puede definirse como la ruptura del aislamiento en el aire entre dos superficies cargadas eléctricamente con polaridades opuestas, presentándose particularmente en redes eléctricas expuestas, las cuales ocurren ante fallas del blindaje proporcionado por el cable de guarda y dicha sobretensión puede provenir de una línea de transmisión adyacente o producirse la descarga atmosférica en una subestación, lo cual, es muy poco probable ya que la superficie en la cual se encuentra es relativamente reducida en comparación con la trayectoria de la línea de transmisión. Además, las sobretensiones atmosféricas pueden afectar a una sola fase o afectar a todas las fases de forma similar y cabe mencionar que las sobretensiones conducidas por las líneas de transmisión sufren en la subestación reflexiones múltiples.

2.7.1.1 Propiedades de la descarga atmosférica [4]

Entre sus principales propiedades tenemos las siguientes:

2.7.1.1.1 Intensidad y polaridad de la corriente



La corriente de un rayo es una de las propiedades más importantes de una descarga atmosférica, la magnitud de esta corriente es independiente del valor de resistencia que se tenga en el punto de incidencia de la descarga debido a que la impedancia del canal del rayo es relativamente alta, del orden de miles de ohmios.

2.7.1.1.2 Forma de onda de la descarga atmosférica

Normalmente la forma de onda de una descarga atmosférica está especificada por su frente de onda y por su cola, en la cual, el frente de onda es esencialmente el tiempo para alcanzar el valor máximo de corriente y la cola es el tiempo para caer en el valor medio del valor máximo de corriente; por ejemplo, una onda de $1,2 \times 50 \mu s$, alcanza su valor máximo en $1,2 \mu s$ y llega a su valor medio en $50 \mu s$.

2.7.1.1.3 Frecuencia de ocurrencia

La densidad de rayos hacia tierra, expresada como, el número de rayos hacia tierra por kilómetro cuadrado por año; puede ser obtenida a partir del nivel ceráunico de cada región, el cual, representa el número de días de tormenta por año que un observador oye o ve un rayo sin importar el número de descargas atmosféricas que hubo ese día.

2.7.1.1.4 Angulo de incidencia

La incidencia de descargas atmosféricas presenta un determinado grado de inclinación, sin excepción alguna con respecto a la vertical; es de naturaleza estadística, ya que, el ángulo de incidencia variará para cada rayo que se produzca, lo cual, puede introducir algunos errores en el diseño del blindaje de líneas de transmisión y de subestaciones por medio de los cables de guarda.

Alrededor del 90% de las corrientes de rayos son negativas, es decir, nube negativa suelo positivo y el 10% son de polaridad inversa, pero estas últimas son las más rápidas [3]. La amplitud de las corrientes de rayo se extiende de 5 a 200 kA, según una distribución casi normal. La velocidad de crecimiento de las corrientes se sitúa entre $10 \text{ kA}/\mu s$ y más de $80 \text{ kA}/\mu s$. La duración del frente de esta onda de corriente es del orden de 1 a 5 microsegundos, en cambio la cola de la onda de corriente es del orden de la centena de microsegundos. La mayoría de las descargas atmosféricas son múltiples, es decir, ellas se renuevan varias veces a través del mismo canal ionizado, en el curso de una fracción de segundo.

2.7.1.2 Tipos de incidencia de descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión

Las descargas atmosféricas actúan sobre las líneas de transmisión a través de tres incidencias diferentes:



Descargas directas a los conductores.- la sobretensión que aparece en el conductor está dada por el producto de la mitad de la impedancia por la corriente del rayo [6], se produce por el impacto directo de un rayo sobre un conductor de fase, dependerá del grado de protección brindado por el apantallamiento del hilo de guarda. Este tipo de descargas producen altas sobretensiones, ya que, a partir del punto de incidencia del rayo dos ondas viajeras de sobretensión se propagan en sentidos contrarios, la onda viajera en su trayectoria no encuentra discontinuidades a lo largo de la línea de transmisión haciendo que la única variación presente sea un amortiguamiento debido a la parte resistiva de la línea de transmisión.

Descargas directas a las torres o a los cables de guarda.- a este tipo de descarga también se lo conoce como flameo inverso, producen una alta corriente a tierra; un rayo al incidir en el cable de guarda, parte de la corriente viaja a través del mencionado cable hacia las torres adyacentes y la otra parte viaja a través de la torre provocando sobretensiones en la cruceta así como también en la base de la torre debido a la resistencia de pie de torre, esta sobretensión que aparece en la cruceta puede provocar descargas inversas desde la torre hacia el conductor de fase, fenómeno conocido como backflashover, lo cual ocurre si la tensión entre la cruceta y el conductor de fase superan el nivel de aislamiento de la cadena de aisladores. La sobretensión provocada en la torre de impacto es mayor y se va atenuando a medida que viaja a lo largo de la línea de transmisión hasta que el efecto de la descarga desaparezca al cabo del recorrido de ciertos vanos. La presencia de sobretensiones por flameo inverso en sistemas de extra alta tensión (EHV) son menos probables que en sistemas con tensiones nominales inferiores a 230 kV, debido a que la resistencia de aislamiento para estos sistemas suelen ser mayor que la diferencia de potencial generado.

Descargas atmosféricas cercanas a las líneas de transmisión.- Una nube cargada está acompañada de un campo eléctrico muy intenso con respecto al suelo, este campo forma en los conductores de las líneas de transmisión, cargas electrostáticas de compensación, es decir, carga opuesta. En el momento de incidencia de un rayo próximo, el campo con respecto al suelo se anula muy rápidamente, y las cargas electrostáticas, que no han tenido el tiempo de neutralizarse, elevan a los conductores a un potencial igual al que ellas compensaban. La carga en la línea de transmisión se libera y circula en ambas direcciones, provocando ondas viajeras de corriente y tensión. Este potencial, del orden de 150 kV a 500 kV, no produce consecuencia alguna para líneas de alta



tensión, así, para sistemas con tensiones mayores a 69 kV las tensiones inducidas no se consideran.

Todas las sobretensiones producidas por cualquiera de las incidencias mencionadas anteriormente tienen una forma de onda similar y depende en gran parte de las características de los rayos. Además, el frente de onda es un parámetro importante en la generación de sobretensiones, ya que, influye no solo en el valor máximo de la sobretensión sino también en las formas de onda, es así que a menor frente de onda la tensión es mayor.

Cada descarga atmosférica presenta características diferentes, el único elemento en común es la forma de onda de la corriente, la cual, no es oscilatoria y es unidireccional, es decir, de una única polaridad. Además la forma de onda de corriente está relacionada con la forma de onda de tensión a través de la impedancia que ve en su avance de propagación.

2.7.2 Sobretensiones originadas por maniobras

Los sobretensiones transitorias de frente rápido producidas por maniobras son oscilatorios, cuya sobretensión representativa corresponde a un impulso tipo rayo normalizado 1,2/50 μ s, cuyo origen se debe principalmente por la conexión y desconexión de equipos dentro de una subestación, pero también pueden aparecer cuando ocurre una descarga disruptiva en el aislamiento externo, en tal caso, pueden ocurrir esfuerzos significativos entre las espiras de los devanados de los transformadores ubicados próximos a la descarga.

Los valores máximos de sobretensiones originadas por maniobras son generalmente menores que las provocadas por la incidencia de un rayo y dependen del tipo y características del equipo de maniobra. Puesto que la ocurrencia simultánea de sobretensiones de maniobra de frente rápido en más de una fase es altamente improbable, se puede suponer que no aparecen sobretensiones fase - fase más elevadas que las sobretensiones fase - tierra.



CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ATP

3.1 INTRODUCCIÓN

El programa computacional ATP-EMTP (Alternative Transients Programs-Electromagnetic Transients Program), es un software que nos permite simular los fenómenos transitorios que son de naturaleza electromagnética, electromecánica y de sistemas de control en sistemas polifásicos y monofásicos de un SEP.

ATP es una herramienta diseñada para analizar, tanto en individualidad como en su conjunto, los diferentes elementos que componen un sistema eléctrico, así como los sistemas de control asociados a los equipos eléctricos.

Los estudios que utilizan ATP tienen objetivos que se pueden clasificar en 2 categorías:

1. Es el diseño en el cual se incluyen el dimensionamiento de los equipos, coordinación de aislamiento, nivel de tensión, diseño de los elementos de protección y control, etc.
2. Es la solución de los problemas de operación, estos suelen ser fallas en las líneas, análisis de sobretensiones, análisis de transitorios.

Los casos típicos de estudio donde se utiliza ATP son:

- Transitorio de maniobra
 - a) Determinísticos
 - b) Probabilísticos
 - c) Maniobras de reactores
 - d) Maniobra de capacitores
 - e) Maniobra de interruptores
 - f) Re-cierres rápidos
 - g) Tensión transitoria de restablecimiento
 - h) Transitorios de maniobras en cables.
- Impulsos atmosféricos
 - a) Contorneos inversos
 - b) Impulsos inducidos
 - c) Ingresos de impulsos atmosféricos a subestaciones



- Coordinación de aislamiento
 - a) Líneas aéreas
 - b) Subestaciones
 - c) Subestaciones blindadas en SF6 (GIS).
 - d) Descargadores
- Solicitaciones torsionales de ejes
 - a) Resonancia sub-sincrónica
 - b) Rechazo de carga.
- Sistema de alta tensión en corriente continua (HVDC)
 - a) Control
 - b) Transitorios eléctricos
 - c) Armónicas
- Compensadores estáticos
 - a) Control
 - b) Sobre tensiones
 - c) Armónicos
- Ferroresonancia
- Análisis armónico
- Arranque de motores
- Sistemas de control
- Análisis de sistemas desbalanceados

El software ATP-EMTP como se menciona anteriormente resuelve sistemas eléctricos monofásico y trifásicos para lo cual las especificaciones de equipos y definición de parámetros eléctricos son fundamentales. El ATP tiene el objetivo de calcular el valor de las diferentes variables del sistema en un determinado tiempo. Para lograr este objetivo el ATP trabaja con modelos que simulan el comportamiento de los diferentes elementos constitutivos de un sistema eléctrico tales como: resistencias, inductancias, capacitancias, generadores, líneas de transmisión, interruptores, etc. Los cuales son de muy fácil parametrización y nos permite modificar sus características si fuera necesario.

En el software ATP para realizar cualquier estudio intervienen varias aplicaciones, entre las cuales tenemos:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Las diferentes versiones del compilador ATP
- Editor de texto
- Editor gráfico de circuitos eléctricos (ATPDRAW)
- Herramientas para la visualización gráfica de los resultados (PLOTXY)

Todos estos programas se pueden acceder de forma independiente y cada uno de ellos trabaja de forma individual, pero trabajar de esta forma es muy ineficiente y demora el desarrollo. Para evitar esto existe una herramienta llamada ACC (ATP Control Center) que integra todas estas herramientas y nos permite realizar la secuencia de trabajo de una forma rápida y ordenada. Dicha secuencia de trabajo puede ser resumida de la siguiente manera:

1. Mediante el editor gráfico de circuitos eléctricos creamos el modelo de estudio. Se crea en extensión (.adp, .cir, .acp)
2. Una vez creado el modelo de estudio, se crea un archivo fuente de extensión .atp que contiene el código del modelo, este archivo es utilizado por el compilador del ATP. Este archivo también puede ser creado por medio del editor de texto.
3. Ejecutamos el compilador ATP utilizando el archivo .atp como fuente, al realizar esta acción se crean los archivos de extensión .lis y .pl4 que contienen los resultados de la simulación.
4. Visualización de resultados, esto se puede realizar de dos formas, la primera mediante el editor de texto que utiliza como fuente el archivo con la extensión .lis, aquí se muestran los datos y resultados de forma textual y escrita. El archivo de extensión .pl4 se abre con el visualizador gráfico en el cual nos muestra los resultados de una forma gráfica y colorida.

Mediante el siguiente esquema se explica de mejor manera la interacción entre los diferentes programas.

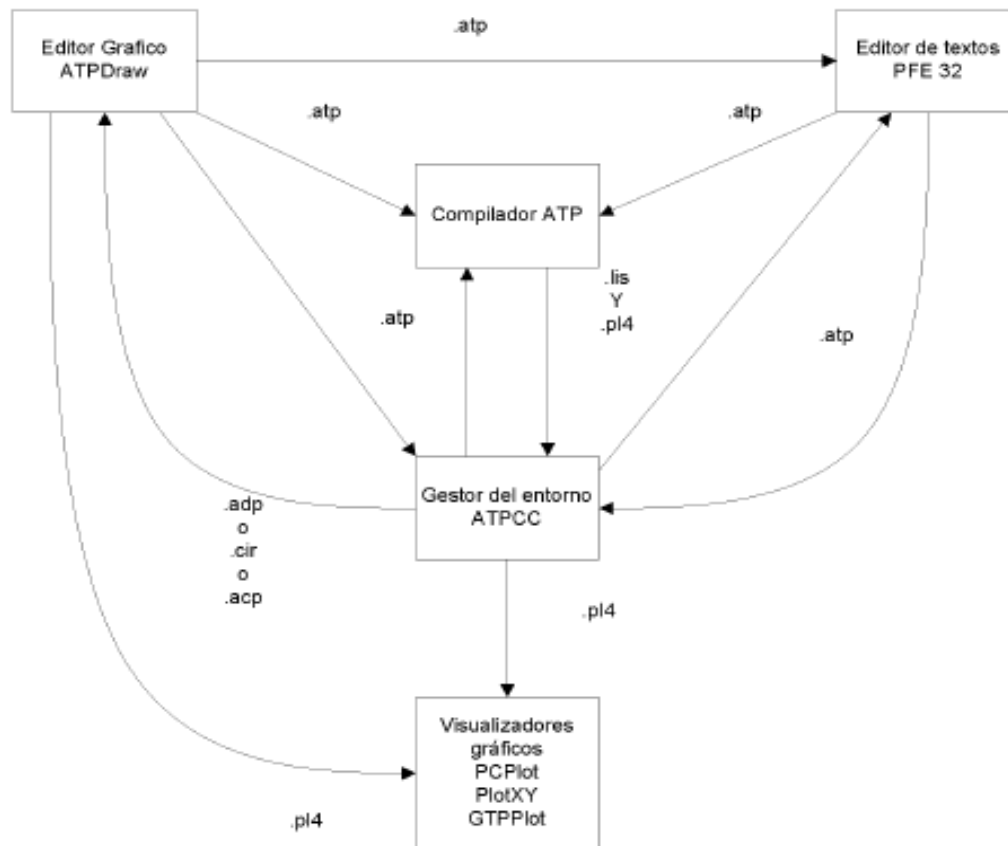


Figura 3. 1 Interacción entre los diferentes programas de ATP-EMTP.

Fuente: ATPDRAW, Users' Manual, version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP, Hans Kr. Høidalen, october 2002 [7].

3.2 MODELOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN EN ATPDRAW

3.2.1 Fuentes equivalentes del sistema

Las fuentes equivalentes empleadas en la red, son equivalentes de cortocircuito (equivalente Thévenin), representadas por fuentes sinusoidales constantes, trifásicas y balanceadas (Figura 3.2), acopladas al sistema a estudiarse, mediante parámetros R-L de secuencia acoplados, estos elementos fueron calculados en base a las magnitudes de cortocircuito trifásico y monofásico en las barras correspondientes (Figura 3.3).

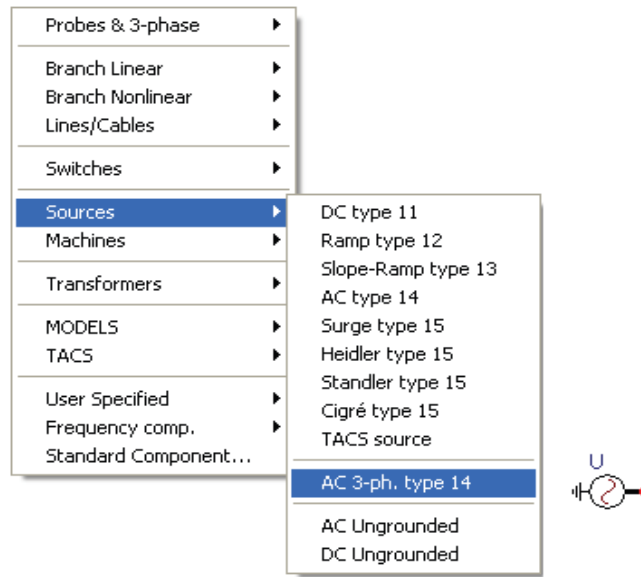


Figura 3. 2 Ventana de la fuente empleada.

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.

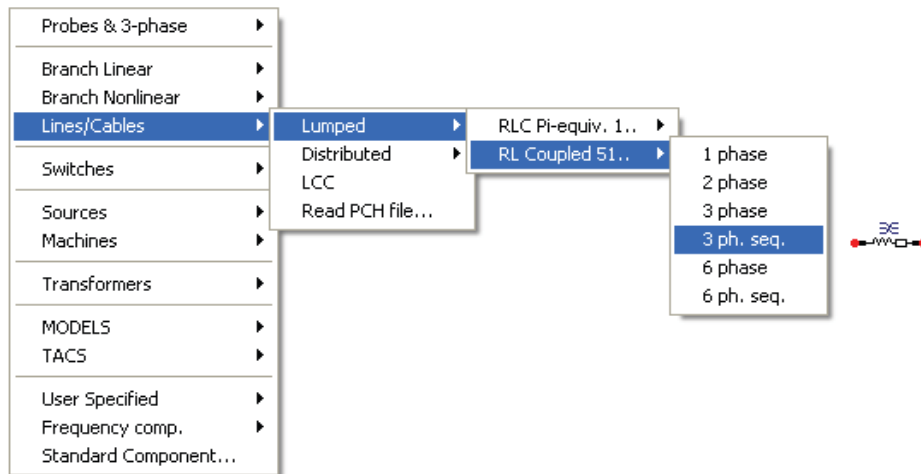


Figura 3. 3 Ventana de datos para equivalente de Thévenin trifásico

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.

3.2.2 Líneas de transmisión

El ATP dispone de modelos de líneas de transmisión de acuerdo al tipo de transitorios. Los circuitos π consideran parámetros concentrados y son una aproximación de los parámetros distribuidos y constantes, sin poder representar líneas con parámetros dependientes de la frecuencia, obteniendo una solución en estado estacionario exacta. El modelo K.C.Lee puede ser usado para obtener un modelo de línea transpuesta o no, con parámetros para una determinada



frecuencia constante. El modelo Semlyen emplea aproximaciones de la impedancia característica y de la constante de propagación, originando inexactitudes, por lo que este modelo está considerado en desuso, como ha ocurrido con Weighting y Hauer.[8]

Los cálculos realizados en el modelo Taku Noda lo realiza en componentes de fase, sin recurrir a la matriz de transformación, el modelo Bergeron actúa igual que el modelo anterior, con la diferencia que se emplea para parámetros distribuidos. El modelo empleado para la presente simulación es JMartí que se particulariza en los párrafos siguientes.

3.2.2.1 Modelo JMartí

La impedancia característica y la función de propagación de ondas son obtenidas de características modales sobre un rango de frecuencia definido por la escala logarítmica, bajo la hipótesis de una matriz de transformación constante.

Luego los anteriores parámetros son sometidos a una función de alto orden racional de aproximación. En el dominio del tiempo, esta aproximación es representada por la suma de exponenciales reales, lo que permite el uso de métodos de convolución recursiva en el dominio del tiempo. El modelo JMartí considera parámetros dependientes de la frecuencia, siendo este modelo el más difundido para análisis de transitorios.

En el ATPDraw al escoger la opción del preprocesador LCC para implementar la línea, aparecen los datos correspondientes a las características principales de la línea y parámetros relacionados a la configuración física de los conductores de fase y guarda, respecto a la torre de transmisión, los mismos que se detallan a continuación [8]:

Rho: Resistividad del suelo en $\text{ohm}\cdot\text{m}$.

Freq. init Hz: Frecuencia inicial para la escala logarítmica.

Length: Longitud de la línea.

Datos específicos del modelo JMartí

- Decades: Número de décadas de la escala logarítmica.
- Freq. matrix Hz: Frecuencia a la cual se calcula la matriz de transformación.
- Points/Dec: Número de puntos de frecuencia por década.
- Freq. SS Hz: Frecuencia en estado estable.



Parámetros del tipo de sistema

1. Transposed: Se señala para los casos de líneas transpuestas.
2. Auto bundling: Si está marcada indica sí que se trabaja por conductor no por fase.
3. Seg. ground: Segmentación de cables de guarda. Si esta activada la opción se asume que el cable de guarda está constantemente aterrado.
4. Skin effect: Si el icono está activado se considera el efecto piel.
5. Real trans. matrix: Recomendado para simulación de transitorios.

Line/Cable Data: C:\ATPDRAW\LCC\LTCUENCAGUALACEO.alc

Model | Data

System type: Overhead Line #Ph: 3

☐ Transposed

☒ Auto bundling

☒ Skin effect

☒ Segmented ground

☒ Real transf. matrix

Units: ☒ Metric ☐ English

Standard data:

Rho [ohm*m] 132

Freq. init [Hz] 0.01

Length [km] 21.022

Model

Type:

☐ Bergeron

☐ Pl

☒ JMarti

☐ Semlyen

☐ Noda

Data

Decades 6 Points/Dec 5

Freq. matrix [Hz] 5000 Freq. SS [Hz] 60

☒ Use default fitting

Comment: Order: 0 Label: Hide

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

Figura 3. 4 Cuadro de diálogo del modelo de línea de la rutina LCC

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.

Para el caso de los datos de la ubicación geométrica y de las características de los conductores el ingreso se lo hace en la pestaña data y los campos a llenarse se los muestra en la figura 3.5



Line/Cable Data: C:\ATPDRAW\LCC\LTCUENCAGUALACEO.alc

Model	Data									
#	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.27	0.81	0.24	5.6	15.3	7.5	0	0	0
2	2	0.27	0.81	0.24	0	17.5	9.7	0	0	0
3	3	0.27	0.81	0.24	5.6	19.7	11.9	0	0	0

Add row Delete last row Insert row copy

Move

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

Figura 3. 5 Cuadro de diálogo de los parámetros geométricos de la rutina LCC

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.

Donde se tiene:

Ph.no. es el número de fases del conductor, la numeración debe ser 1, 2, 3...etc., para las fases y 0 para los hilos de guarda.

Rin, es el radio interno del conductor.

Rout, es el radio externo del conductor.

Resis, cuando no se incluye el efecto piel se debe colocar el valor de la resistencia AC, caso contrario se pondrá la resistencia DC del conductor.

Horiz, es la distancia horizontal entre los centros de conductor o del conjunto de conductores en haz, en una referencia especificada por el usuario, la misma referencia debe ser usada para todos los conductores del mismo caso.

Vtower, es la altura vertical del centro del conductor o del conjunto de conductores en haz medido desde la torre hasta el suelo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Vmid, es la altura vertical del centro del conductor o del conjunto de conductores en haz medida desde el medio vano hasta el suelo.

Los siguientes términos aparecen si se ha seleccionado previamente la opción Auto bunding.

Separ, es la distancia de separación entre los centros de dos conductores adyacentes de un conjunto de conductores en haz.

Alpha, es la posición angular del centro a uno de los conductores del conjunto de conductores en haz.

NB, es el número de conductores que forman parte del conjunto de cables en haz.

3.2.3 Interruptores

En el programa ATP existe varios modelos de interruptores como los controlados por tiempo o por Tensión, interruptores estadísticos, interruptores sistemáticos y de medición.

Para los interruptores controlados por tiempo las maniobras de cierre y apertura son realizadas una única vez y son determinadas por el tiempo especificado por el usuario.

Los interruptores estadísticos operan de acuerdo a los tiempos de cierre generados por una distribución estadística normal o uniforme, para considerar las distintas condiciones de operación con respecto al ciclo de la onda de Tensión [10].

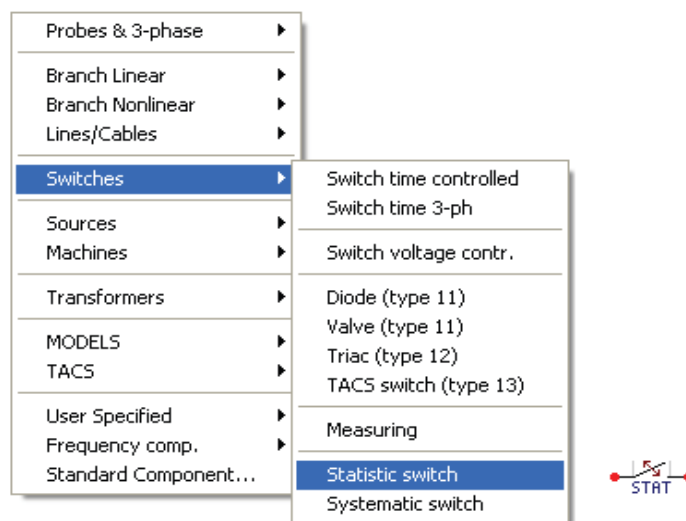


Figura 3. 6 Ventana de la clase de interruptores

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.



De la amplia gama de interruptores que posee el software ATPDRAW se han utilizado dos.

El primero es el interruptor controlado por tiempo el cual realiza maniobras de apertura o cierre en un tiempo determinado por el usuario una sola vez.

El segundo interruptor utilizado es el estadístico el cual puede ser maestro o esclavo, el interruptor maestro es independiente de cualquier otro interruptor estadístico mientras que el interruptor esclavo depende del tiempo de un interruptor maestro, en la figura 3.7 se muestra la ventana de parámetros del interruptor estadístico.

NODE	PHASE	NAME
SW_F	B	
SW_T	B	

Figura 3. 7 Cuadro de diálogo para el interruptor estadístico

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.

Donde se tiene:

Switch type, es donde se escoge el tipo de interruptor que se desea utilizar (master o esclavo).

Open/Close, es el tipo de maniobra a realizarse.

T, es el tiempo promedio en el que el interruptor abre o cierra.



Dev., es la desviación estándar, para los interruptores esclavo tiene un retardo que depende del tiempo del interruptor master.

Distribution, es el tipo de distribución que se desea que siga el interruptor.

3.2.4 Transformador

Se ha optado por la rutina SATTRAFO trifásico. Como muestra la Figura 3.8 es necesario especificar el número de bobinados, los niveles de tensión y las conexiones de cada bobinado. En virtud de las conexiones, el cambio de fase de este menú se adapta a la configuración de todos los tipos desfase.

The dialog box is titled "Component: SATTRAFO.sup". It has two tabs: "Attributes" and "Characteristic". The "Attributes" tab is active.

	Prim.	Sec.	Tert.
U [V]	40	12.7	22
R [ohm]	0.11	0.047	0.001
L [mH,ohm]	3.808	0.0484	0.0363

Coupling: Y Y D
Phase shift: 0 30
I(0)= 0.092 Rm= 432818.1
F(0)= 149.44
☐ 3-leg core
☒ RMS
☒ 3-winding

Order: 0 Label:
Comment: GUALACED
Output: 0 - No
☐ Hide
☐ Lock

Buttons: OK, Cancel, Help

Figura 3. 8 Cuadro de diálogo para la rutina SATTRAFO trifásico

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.

Donde se tiene que:

I(0), Corriente en amperios a través de la rama de magnetización en estado estable

F(0), Flujo en webers/vuelta en la rama de magnetización en estado estable

Rm, Resistencia en la rama de magnetización en Ω , este valor este referido al primario



También en esta rutina se ingresa la característica de saturación, referidas al lado primario del transformador, tal como se muestra en la siguiente figura:

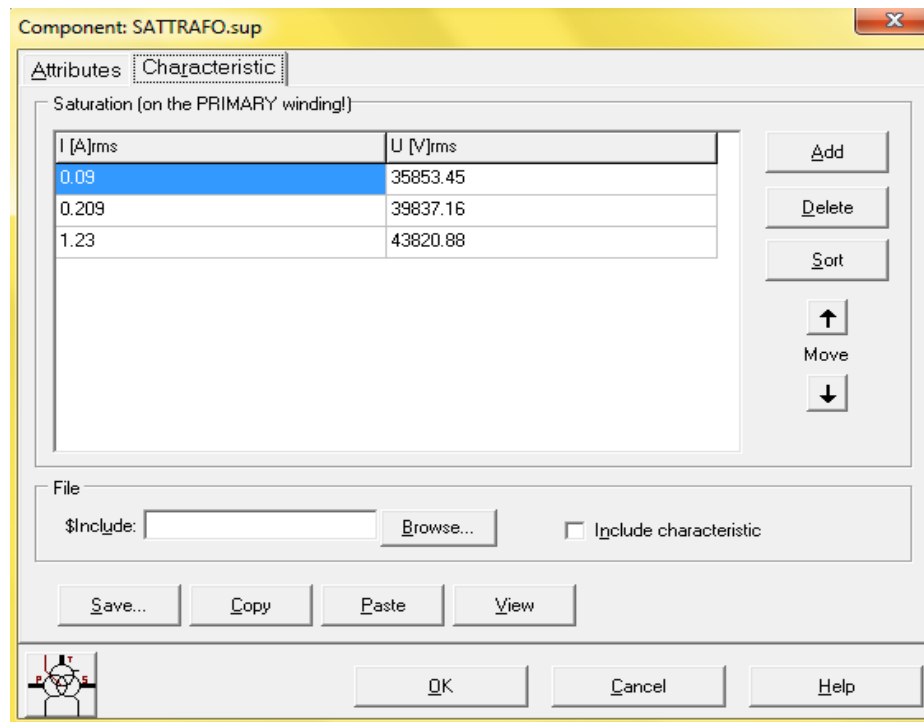


Figura 3. 9 Cuadro de diálogo para la característica de saturación, corriente vs tensión del transformador

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.

3.2.5 Pararrayos

Para la modelación del pararrayos se utilizó la rama no lineal Mov type 92 3-ph la cual nos permite ingresar la característica no lineal del pararrayos, en la figura 3.10 se muestra el cuadro de diálogo del modelo.



Component: MOV_3.SUP

Attributes | Characteristic

DATA	VALUE
Vref	10000
Vflash	-1
Vzero	0
COL	1
SER	1
ErrLim	0.05

NODE	PHASE	NAME
From	3	
To	3	

Order: 0 Label:

Comment:

Output
0 - No

☐ Hide
☐ Lock

MOV OK Cancel Help

Figura 3. 10 Cuadro de diálogo del modelo MOV type 92 3-ph

Fuente: Alternative Transient Program (ATP), Preprocesador gráfico ATPDraw.

Donde se tiene:

Vref, es el Tensión de referencia.

Vflash, es el Tensión de descarga en por unidad utilizando como Tensión base Vref.

Si no se tiene Gap se utiliza un número negativo.

Vzero, es el Tensión inicial en voltios, en casi todos los casos se pone cero.

#COL, es el número de columnas del pararrayos, para una simple rama de bloques COL= 0, 1 o blanco, para dos ramas en paralelo COL= 2.

#SER, Número de bloques en serie de cada rama.

ERRLIM, tolerancia adecuada en p.u.



CAPITULO IV: APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS A LA LINEA DE SUBTRANSMISIÓN CUENCA-MACAS, UTILIZANDO EL SIMULADOR ATP.

Antes de empezar con el desarrollo de este capítulo, cabe mencionar que los estudios realizados en este proyecto se centran en la determinación de las sobretensiones y sobrecorrientes que aparecen en la línea de subtransmisión Cuenca-Macas y no se considera el análisis del circuito secundario.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO EN ESTUDIO

A continuación se detalla cada subestación a nivel de 69kV, que pertenece a este subsistema en estudio:

Subestación Gualaceo, a una distancia de 20,8 km de la subestación Cuenca Rayoloma, con un transformador de tres devanados 10 MVA 69/22 kV, tiene 2 alimentadores primarios Gualaceo y SIGSIG, además cuenta con una posición de reserva.

Subestación Limón, esta subestación está a una distancia de 56,44 km. de la subestación Gualaceo, tiene un transformador de 2.5 MVA con nivel de tensión de 69/13.8 kV con 2 alimentadores primarios Indanza S.J. Bosco y Centro Limón.

Subestación Méndez, se encuentra a una distancia de 38,54 Km. de la subestación Limón tiene un transformador de 2.5 MVA con un nivel de tensión de 69/13.8 kV con 2 alimentadores primarios que son Méndez y Huambí y un alimentador de reserva.

Subestación Macas, se encuentra a una distancia de 51,5 Km. de la subestación Méndez, con un transformador de 5 MVA de 69/13.8 kV. y 2 alimentadores primarios que son Macas, Sucúa, un alimentador de servicios auxiliares y uno para reserva, es la cantidad de elementos que esta subestación posee, y es la primera en recibir la energía de la central Abanico.

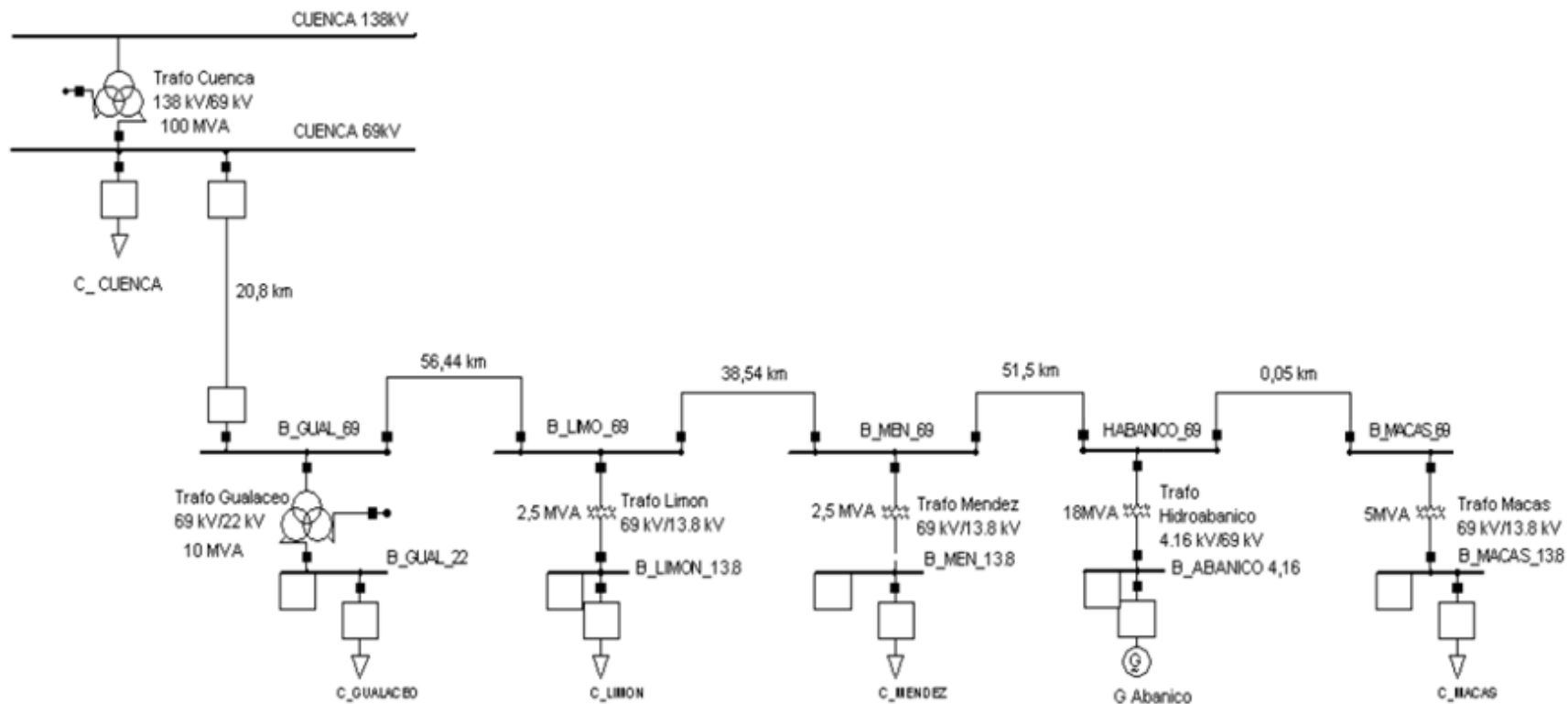


Figura 4. 1 Diagrama Unifilar de la Línea de Subtransmisión Cuenca – Macas a 69kV

Fuente: TESIS ANDRÉS MAURICIO GUERRERO PAREDES “ANÁLISIS DE LA INTERCONEXIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ABANICO AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO” 2010, [16].

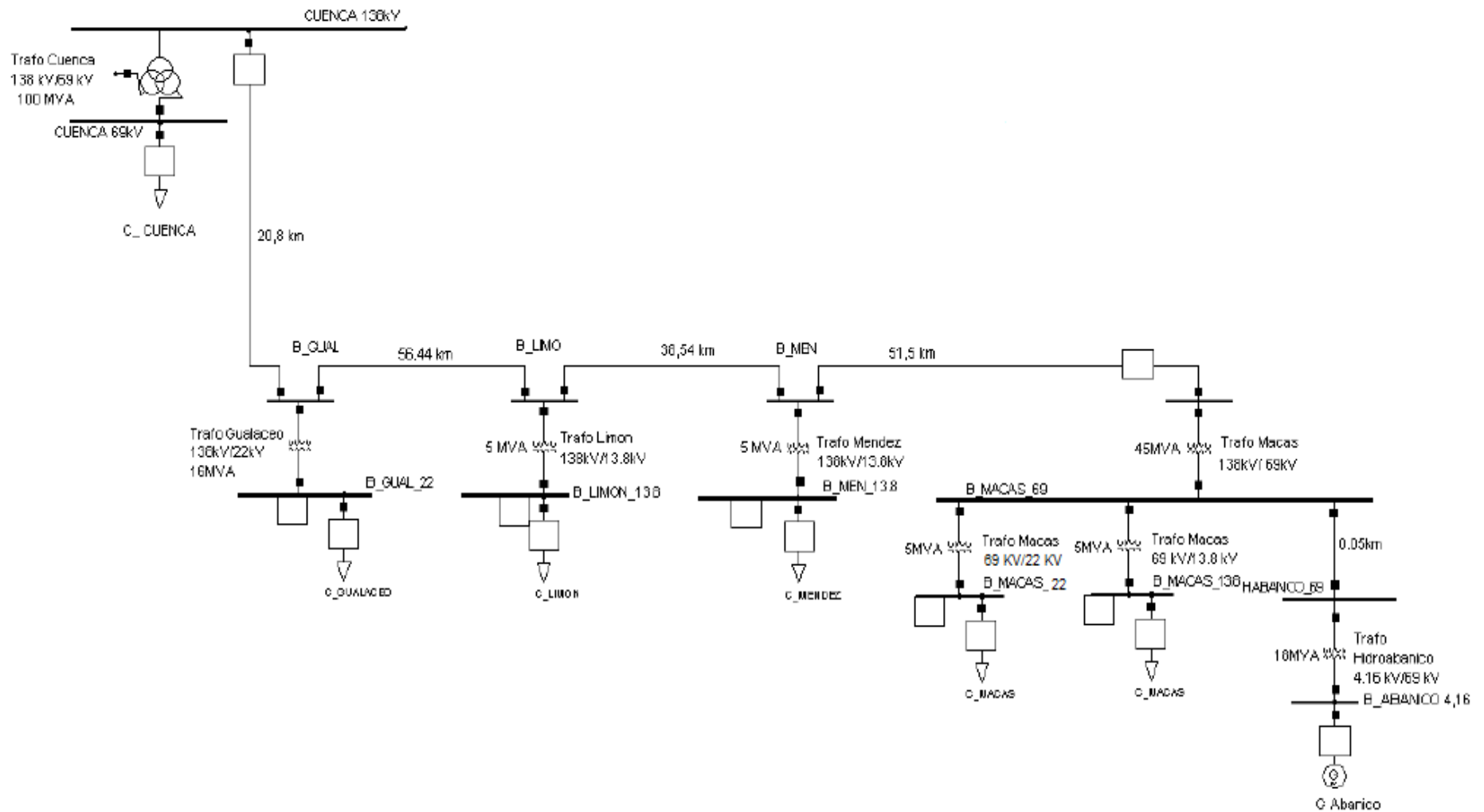


Figura 4. 2 Diagrama Unifilar de la Línea de Subtransmisión Cuenca – Macas a 138 kV

Fuente: TESIS ANDRÉS MAURICIO GUERRERO PAREDES “ANÁLISIS DE LA INTERCONEXIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ABANICO AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO” 2010, [16].



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Los cuadros presentados a continuación fueron elaborados en base a los parámetros e información del sistema, proporcionados por la Dirección de Planificación de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

Cuadro 4. 1 Datos de los transformadores de dos devanados (69kV)

TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS								
S/E	NOMBRE	Tensión (kV)		Resistencia	Reactancia	Capacidad	Perdidas(KW)	
		P	S	P.U	P.U	MVA	Cobre	Vacío
21	MACAS	69	13,8	0,02	1,3	5	30	5
22	MENDEZ	69	13,8	0,204	2,736	2,5	15	2
23	LIMÓN	69	13,8	0,204	2,792	2,5	15	2

Cuadro 4. 2 Datos de los transformadores de tres devanados (69kV)

TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS														
S/E	NOMBRE	TENSION			Prim-Sec	Prim-Terc	Sec-Terc	Prim	Secun	Terc	POTENCIA			PERDIDAS
		kV			%	%	%	P.U.	P.U.	P.U.	MVA			KW
		P	S	T	Xps	Xpt	Xst	Xp	Xs	Xt	Prim	Sec	Terc	Cobre Vacío
15	Gualaceo	69	22	11	8,9	11,25	4,32	0,008	0,001	0,003	10	10	3,3	65 11

Para la simulación al nivel de 138kV, se considera los siguientes datos para los transformadores de las subestaciones:

Cuadro 4. 3 Datos de los transformadores de dos devanados (138kV)

TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS (138kV)									
S/E	NOMBRE	TENSION (kV)		Rp	Xp	Rs	Xs	CAPACIDAD	PERDIDAS
		P	S	Ω	Ω	Ω	Ω	MVA	(KW) Vacío
21	MACAS	69	13,8	0,95	110,032	0,038	0,55	5	5
21	MACAS	69	22	0,95	110,032	0,096	1,39	5	5
21	MACAS	138	69	0,021	0,535	0,0052	0,016	45	24,7
22	MENDEZ	138	13,8	3,88	440,12	0,038	0,55	5	5
23	LIMÓN	138	13,8	3,88	440,12	0,038	0,55	5	5
15	GUALACEO	138	22	0,29	9,52	0,003	0,03	16	16



Cuadro 4. 4 Características principales del sistema

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS	VALOR	UNIDADES
Tensión nominal	69 - 138	kV
Numero de circuitos	1	-----
Frecuencia	60	Hz
Longitud	176,28	km
Vano medio	250	m

4.1.1 Características de los conductores

Los conductores utilizados en las fases y en el cable de guarda, para la línea de subtransmisión en estudio son los siguientes:

Cuadro 4. 5 Características de los conductores

CONDUCTOR	# DE HILOS	Rint(cm)	Rext(cm)	R(Ω /Km DC)
ACSR 266.8 MCM	26/7	0,24	0,81	0,24
ACERO GALV. 5/16 PUL.	7	0	0,39	0,45

4.1.2 Características de las estructuras

Para realizar las diferentes simulaciones, se ha considerado el tipo de estructura que más se repite en cada uno de los tramos de la línea de subtransmisión Cuenca-Macas al nivel de tensión de 69kV; y los mismos datos se utilizan para las simulaciones al nivel de tensión de 138kV.

También en las simulaciones, se considera que la resistividad del terreno es de 132 Ω /m para todo el tramo de la línea.

4.1.2.1 Estructura SL-CL

Este tipo de estructura es la que en mayor cantidad se repite en el tramo de la línea desde la S/E Cuenca Rayoloma hasta la S/E Limón, las características de este tipo de estructura se presenta en la siguiente figura:

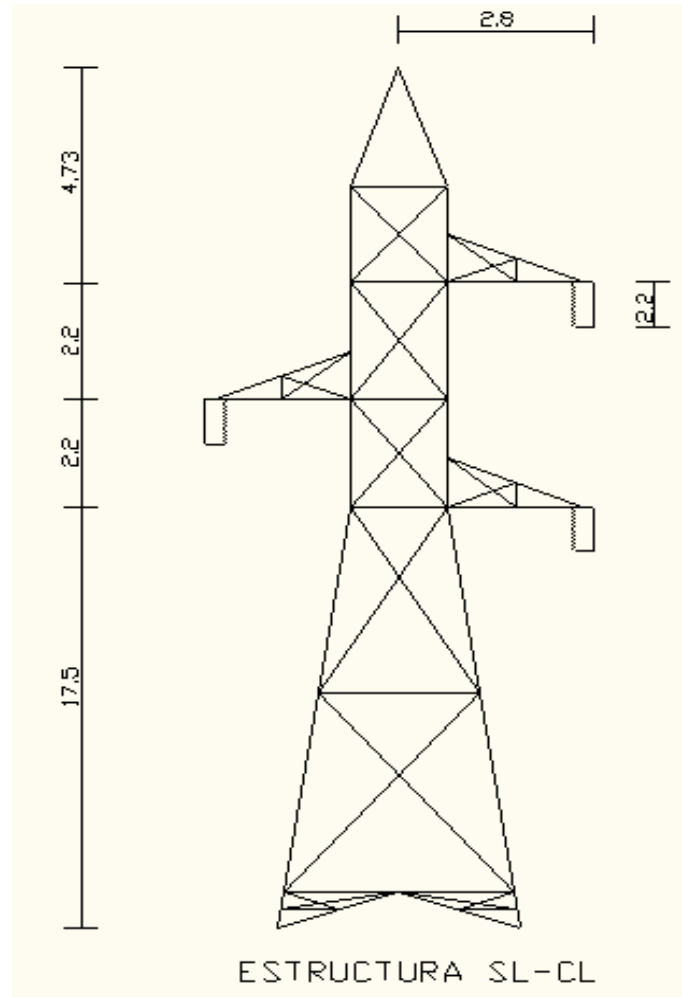


Figura 4. 3 Estructura SL-CL

Fuente: Elaboración del autor en base a los parámetros del sistema proporcionados por la Dirección de Planificación de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

4.1.2.2 Estructura ACACIA/SER

Este tipo de estructura es la que más se repite en el tramo de la línea desde la S/E Limón hasta la S/E Macas, las características de este tipo de estructura se presenta en la siguiente figura:

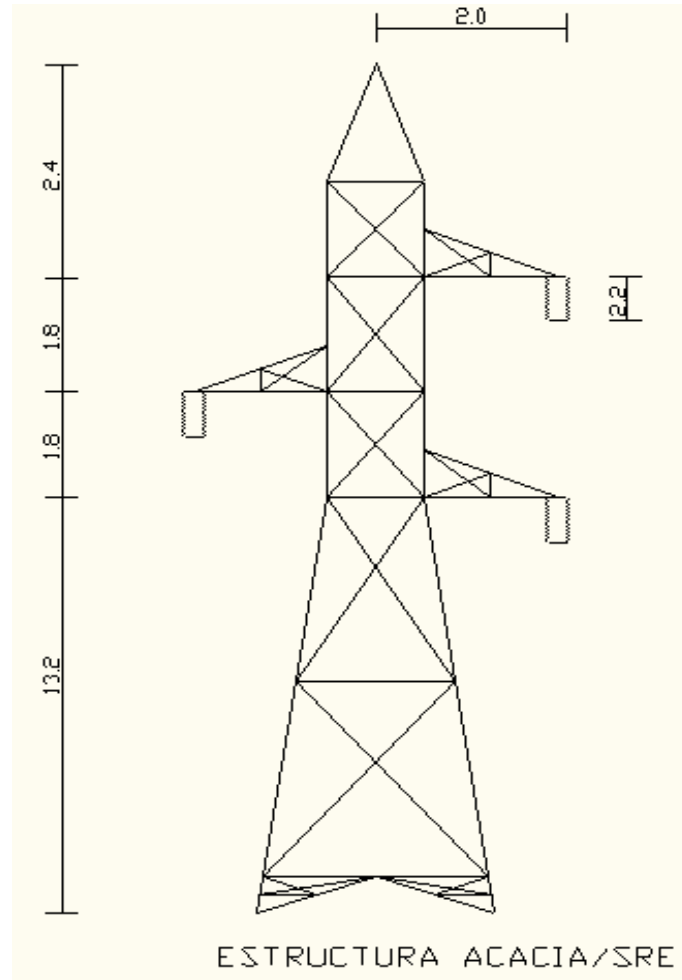


Figura 4. 4 Estructura ACACIA/SER

Fuente: Elaboración del autor en base a los parámetros del sistema proporcionados por la Dirección de Planificación de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

4.1.3 Equivalentes de Thévenin

Estos equivalentes tienen como función el representar a un sistema en un solo punto. Esto se realiza mediante el teorema de Thévenin que dice: “Cualquier circuito lineal de elementos resistivos y fuentes de energía con un par determinado de terminales pueden representarse por una combinación en serie de una fuente de voltaje ideal y una resistencia”. Los equivalentes de Thévenin que se utilizan para las simulaciones, son los obtenidos a demanda mínima, con el fin de obtener las peores condiciones.

Los cuadros a continuación, resumen los valores de los equivalentes de Thévenin en los extremos de la línea utilizados en las simulaciones, todos los valores se encuentran en Ω .



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 6 Equivalentes de Thévenin en la subestación Cuenca Rayoloma y en la central Hidroabanico a nivel de 69kV.

S/E	R0	X0	R1	X1
CUENCA	3,57	10,33	1,35	4,57
H. ABANICO	0,07	5,01	9,11	24,75

Fuente: Elaboración del autor en base a los parámetros del sistema

El equivalente de Thévenin en la central Hidroabanico a 69kV, se utilizará para las simulaciones a nivel de 138kV, ya que este nivel de tensión no cambia en esta barra, para todas las simulaciones realizadas.

Para las simulaciones a nivel de 138kV, se consideran los siguientes equivalentes de Thévenin en la subestación Cuenca Rayoloma:

Cuadro 4. 7 Equivalentes de Thévenin en la subestación Cuenca Rayoloma a nivel de 138kV.

EQUIVALENTES DE THÉVENIN 138kV				
AÑO	S/E CUENCA(138kV)			
	R0	X0	R1	X1
2012	14,3	41,4	6,1	20,86
2015	12,21	35,85	4,72	16,14
2020	8,67	26,65	3,38	12,04

Fuente: Elaboración del autor en base a los parámetros del sistema

4.1.5 Cargas en las subestaciones

Para realizar las simulaciones, se consideran las potencias activas y reactivas en cada subestación, que conforman el tramo de la línea Cuenca- Macas; se debe anotar que se considera como punto de referencia a la subestación Cuenca Rayoloma, donde se consideran los equivalentes de Thévenin.

Con los datos de potencia activa y reactiva en cada subestación, se calculan las impedancias compuestas por una resistencia y una reactancia en serie; y son estos valores los que se ingresan en el programa para realizar las simulaciones.

Las resistencias y las reactancias se calculan con las siguientes formulas, en Ω :

$$R = \frac{PU^2}{S^2}$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$X = \frac{QU^2}{S^2}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

donde la potencia activa P, la potencia reactiva Q, la potencia aparente S, y la tensión U son trifásicos.

Los cuadros siguientes resumen los valores de las impedancias, que representan las cargas de las subestaciones en demanda mínima; estos datos se utilizarán para las diferentes simulaciones.

Los cuadros presentados a continuación, fueron elaborados por el autor en base a los parámetros del sistema, proporcionados por la Dirección de Planificación de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

Cuadro 4. 8 Potencia de las cargas y sus respectivas impedancias para el nivel de tensión de 69kV-2011, demanda mínima.

	GUALACEO	LIMÓN	MÉNDEZ	MACAS
P ACTIVA (KW)	3115,60	473,38	686,18	2504,00
Q REACTIVA (KVAR)	259,32	197,90	81,63	1316,00
S APARENTE (KVA)	3126,37	513,08	691,02	2828,76
R (Ω)	154,28	342,45	273,66	59,59
X (Ω)	12,84	143,16	32,56	31,32

Cuadro 4. 9 Potencia de las cargas y sus respectivas impedancias para el nivel de tensión de 138kV-2012, demanda mínima

	GUALACEO	LIMON	MENDEZ	MACAS 13,8	MACAS 22
P ACTIVA (MW)	5,16	0,64	0,98	1,42	2,13
Q REACTIVA (MVAR)	0,16	0,25	0,14	0,68	1,01
S APARENTE (MVA)	5,16	0,69	0,99	1,57	2,36
R (Ω)	93,71	258,17	190,44	109,10	185,52
X (Ω)	2,91	100,85	27,21	52,24	87,97



Cuadro 4. 10 Potencia de las cargas y sus respectivas impedancias para el nivel de tensión de 138kV-2015, demanda mínima

	GUALACEO	LIMON	MENDEZ	MACAS 13,8	MACAS 22
P ACTIVA (MW)	5,83	0,78	1,19	1,72	2,58
Q REACTIVA (MVAR)	0,19	0,31	0,17	0,82	1,23
S APARENTE (MVA)	5,83	0,84	1,20	1,91	2,86
R (Ω)	82,93	210,85	156,83	90,22	152,86
X (Ω)	2,70	83,80	22,40	43,01	72,87

Cuadro 4. 11 Potencia de las cargas y sus respectivas impedancias para el nivel de tensión de 138kV-2020, demanda mínima

	GUALACEO	LIMON	MENDEZ	MACAS 13,8	MACAS 22
P ACTIVA (MW)	7,15	1,08	1,65	2,38	3,57
Q REACTIVA (MVAR)	0,23	0,43	0,23	1,13	1,70
S APARENTE (MVA)	7,15	1,16	1,67	2,63	3,95
R (Ω)	67,62	152,21	113,22	65,30	110,51
X (Ω)	2,18	60,60	15,78	31,00	52,63

4.2 SOBRETENSIONES TEMPORALES

Para obtener las sobretensiones y sobrecorrientes en el sistema, se calculan las tensiones y las corrientes en las subestaciones en condiciones normales de operación, tanto al nivel de tensión de 69kV como a 138kV; esto con el fin de realizar su respectiva comparación con las sobretensiones y las sobrecorrientes que se presenten en el análisis transitorio.

En las figuras siguientes se observan los diagramas del sistema eléctrico en estudio, en el programa ATPdraw; tanto al nivel de tensión de 69kV como a 138kV en condiciones normales. Estos diagramas se utilizan para las diferentes simulaciones de transitorios electromagnéticos, con su respectiva variación dependiendo del caso en estudio.

Las tensiones obtenidas de las simulaciones serán en los puntos de derivación de las ramas de carga en cada subestación, mientras que las corrientes obtenidas serán a las salidas de cada subestación, asumiendo que la corriente fluye desde la



UNIVERSIDAD DE CUENCA

subestación Cuenca Rayoloma hacia la central Hidroabánico, según se observa en las figuras 4.5 y 4.6.

La corriente de la subestación Macas se mide a la salida de esta subestación, vista desde la central Hidroabánico, ya que todas las medidas tanto de corrientes como de tensiones se obtienen después del equivalente de Thévenin.

Las resistencias conectadas al cable de guarda, representan la resistencia de pie de torre, la cual tiene un valor máximo de $10\ \Omega$, este valor se utiliza para las simulaciones realizadas.

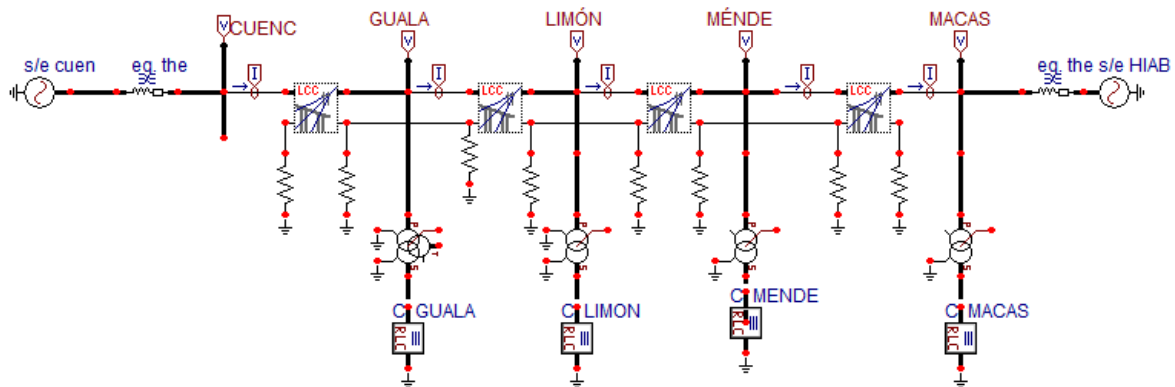


Figura 4. 5 Diagrama de la línea de subtransmisión Cuenca-Macas a 69kV en condiciones normales, en ATPDraw.

Fuente: Elaboración del autor en el programa de simulación ATPdraw.

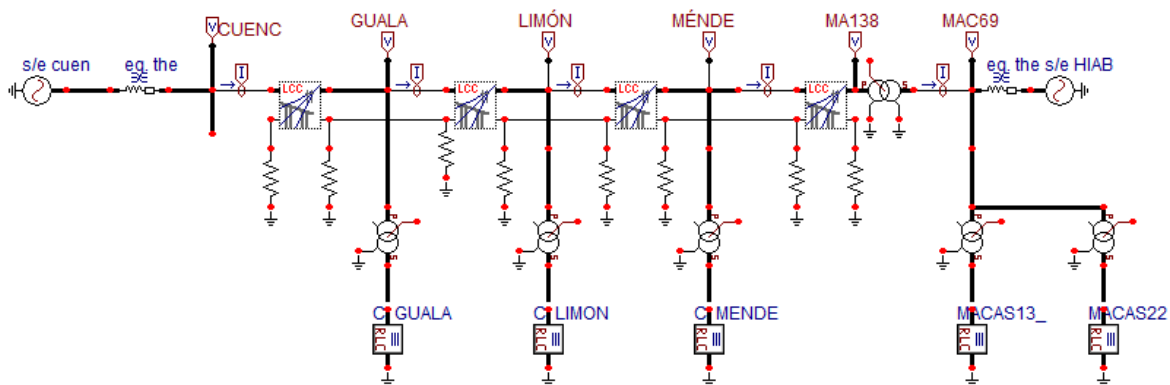


Figura 4. 6 Diagrama de la línea de subtransmisión Cuenca-Macas a 138kV en condiciones normales, en ATPDraw.

Fuente: Elaboración del autor en el programa de simulación ATPdraw.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Las tensiones obtenidas de las simulaciones en cada subestación, se encuentran en por unidad, con una tensión base de $69 * \sqrt{2}/\sqrt{3} \text{ kV}$ para las simulaciones al nivel de 69kV y una tensión base de $138 * \sqrt{2}/\sqrt{3} \text{ kV}$ para las simulaciones al nivel de 138kV; mientras que las corrientes obtenidas en cada una de las fases, se encuentran en amperios.

Las tensiones y corrientes que se muestran en los cuadros obtenidos de las diferentes simulaciones, son los valores máximos después de producirse cualquier evento que se encuentre analizando; estos valores pueden ser positivos o negativos, dependiendo del ciclo de la onda de tensión o de corriente, en cada una de las fases de su respectiva subestación.

Cuadro 4. 12 Tensiones y corrientes en la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, en condiciones normales, a nivel de 69 kV. (mínima demanda)

ANTES DE NINGUN EVENTO-69kV, mínima demanda						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,011	1,010	1,011	47,2	46,9	42,5
GUALACEO	1,011	1,010	1,009	20,9	17,8	17,8
LIMON	1,016	1,016	1,014	10,9	9,5	10,5
MENDEZ	1,018	1,018	1,016	9,5	9,8	10,6
MACAS	1,019	1,019	1,019	11,3	11,6	10,3

Cuadro 4. 13 Tensiones y corrientes en la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, en condiciones normales, a nivel de 138kV. (mínima demanda)

ANTES DE NINGUN EVENTO 138kV AÑO 2012 (mínima demanda)						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,008	1,006	1,007	67,9	62,9	57,0
GUALACEO	1,010	1,009	1,008	48,3	42,0	42,4
LIMON	1,018	1,017	1,015	25,1	22,5	23,6
MENDEZ	1,020	1,020	1,018	10,4	9,2	11,3
MACAS (69kV)	1,020	1,019	1,019	24,8	22,9	19,6



Cuadro 4. 14 Tensiones y corrientes en la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, en condiciones normales, a nivel de 138kV. (máxima demanda)

ANTES DE NINGUN EVENTO 138kV AÑO 2012 (máxima demanda)						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,004	1,003	1,004	92,5	88,7	81,0
GUALACEO	1,005	1,004	1,002	47,8	41,9	41,8
LIMON	1,011	1,011	1,008	24,5	21,7	23,3
MENDEZ	1,013	1,012	1,010	9,0	7,9	10,9
MACAS (69kV)	1,013	1,012	1,011	84,3	84,3	83,1

Estas tensiones y corrientes en las subestaciones, son obtenidas asumiendo que no existe conexión ni desconexión de reactores en toda la línea; esta condición se asume para todas las simulaciones realizadas.

4.2.1 Efecto Ferranti

Para corroborar lo escrito en el capítulo dos, con relación al efecto Ferranti, se puede observar en los cuadros 4.18 y 4.19, el aumento de tensión al permanecer la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, y con uno de sus extremos abierto.

4.2.1.1 Efecto Ferranti en la Subestación Macas

Para esta simulación se considera la línea en vacío, y se observara el aumento de la tensión en la subestación Macas, manteniendo energizada la subestación Cuenca Rayoloma.

Se realiza esta consideración con la finalidad de mostrar que cuando se encuentra energizada una línea en vacío, la tensión en el extremo de ésta es mayor que la obtenida en el punto donde se realizó la energización.

En la figura siguiente se muestra el diagrama en formato ATPDraw del sistema a ser analizado:

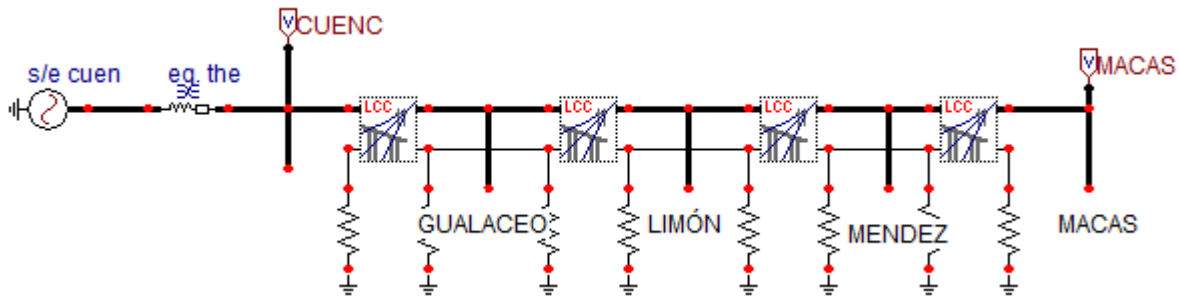


Figura 4. 7 Diagrama en ATPDraw para la simulación del efecto ferranti en la S/E Macas.

Fuente: Elaboración del autor en el programa de simulación ATPdraw.

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 15 Tensiones resultantes por el efecto Ferranti en la S/E Macas

S/E CUENCA				S/E MACAS		
FASES	A	B	C	A	B	C
V pu	1,013	1,013	1,013	1,038	1,039	1,036

Como se observa en el cuadro anterior, existe una sobretensión en la subestación Macas, esto debido al efecto Ferranti.

4.2.1.2 Efecto Ferranti en la Subestación Cuenca Rayoloma

Para esta simulación se utiliza el diagrama anterior, solo que ahora se considera un equivalente de Thévenin en la central Hidroabanico y la subestación Cuenca Rayoloma está en vacío.

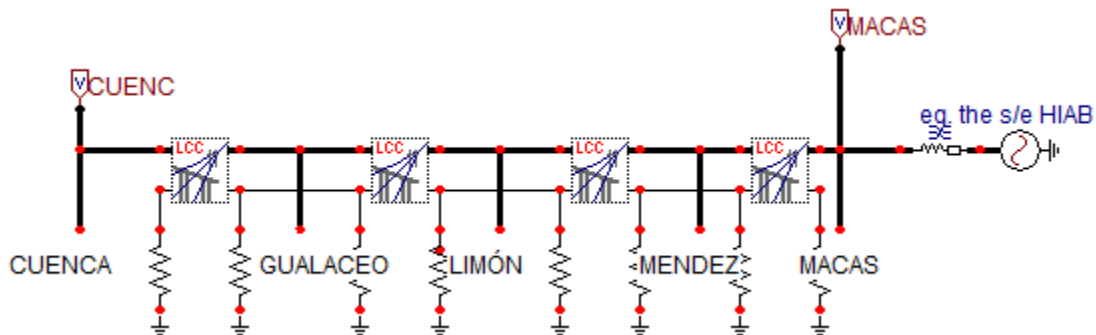


Figura 4. 8 Diagrama utilizado en ATPDraw para la simulación del efecto Ferranti en la S/E Cuenca Rayoloma.

Fuente: Elaboración del autor en el programa de simulación ATPdraw.



Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 16 Tensiones resultantes por el efecto Ferranti en la S/E Cuenca Rayoloma

S/E MACAS				S/E CUENCA		
FASES	A	B	C	A	B	C
V pu	1,046	1,043	1,045	1,072	1,068	1,069

Se observa un aumento de la tensión en la subestación Cuenca Rayoloma a causa del efecto Ferranti.

Los resultados obtenidos anteriormente, son los mismos que se obtuvo en la simulación al nivel de 138kV.

4.2.2 Falla fase – tierra

Para esta simulación se considera que la falla fase-tierra se produce en la fase C del subsistema, la cual se encuentra en parte baja de la línea de subtransmisión con respecto al plano de tierra.

Las simulaciones se realizan desde un tiempo igual a cero, y para observar el comportamiento de las formas de ondas, tanto de la tensión como de la corriente antes de la falla, se considera que la falla se produce 30 ms después de haber iniciado la simulación; ya que en este tiempo la forma de onda de tensión de la fase C, toma su valor máximo negativo y en esta condición se producen las mayores sobretensiones y sobrecorrientes.

También se considera que después de la falla, no actúan las diferentes protecciones del sistema, por lo tanto la falla se mantiene durante el tiempo máximo de simulación, que para nuestro caso es de 70 ms.

En las simulaciones realizadas de la falla fase-tierra, no se consideran los pararrayos en las subestaciones, ya que la información obtenida de sobretensiones máximas sin pararrayos, servirá en la práctica para el dimensionamiento correcto de los pararrayos en cada subestación; del mismo modo las sobrecorrientes obtenidas, sirven para obtener información sobre la capacidad de cortocircuito de cada uno de los interruptores instalados en el subsistema en estudio.



Las simulaciones para la falla fase-tierra, se realiza tanto para demanda máxima como para demanda mínima de carga en cada una de las subestaciones; pero los equivalentes de Thévenin se considera para todas las simulaciones, de demanda mínima.

Los resultados gráficos de esta simulación, se obtienen solo para demanda mínima, ya que en esta situación se presentan las mayores anomalías, en la línea de subtransmisión en estudio.

Todas las figuras que se presentan a continuación, son obtenidas de simulaciones realizadas en el programa Alternative Transient Program (ATP), según los casos analizados.

4.2.2.1 Falla fase-tierra en la subestación Cuenca Rayoloma

4.2.2.1.1 Falla fase-tierra en la subestación Cuenca Rayoloma al nivel de 69kV.

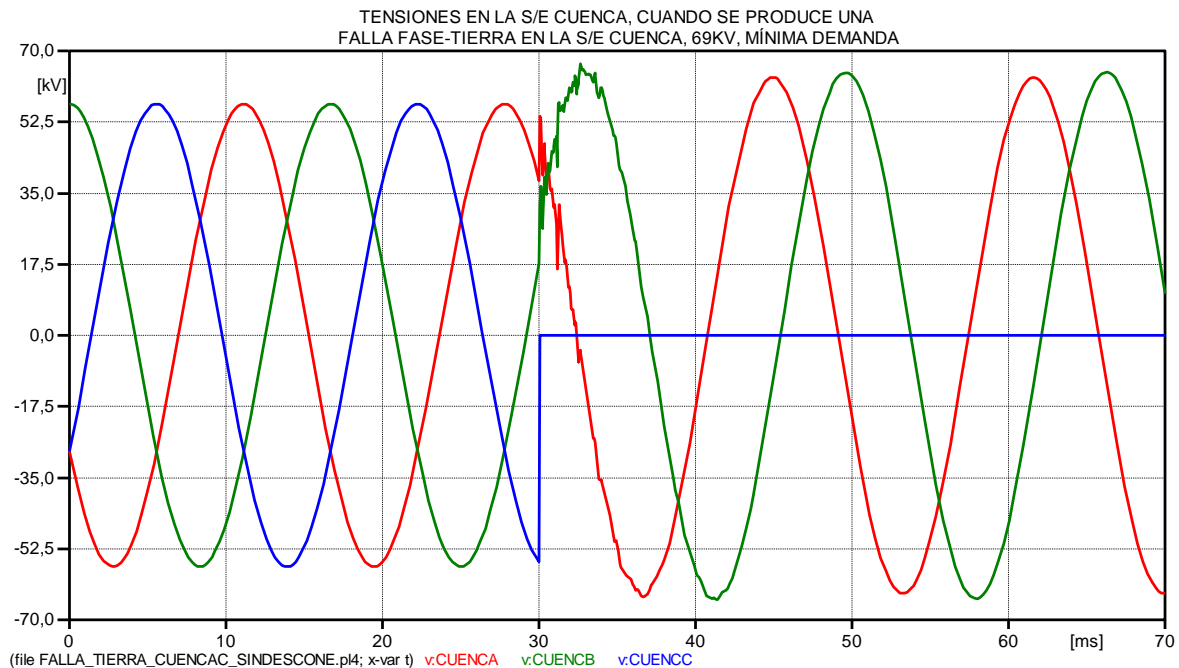


Figura 4. 9 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

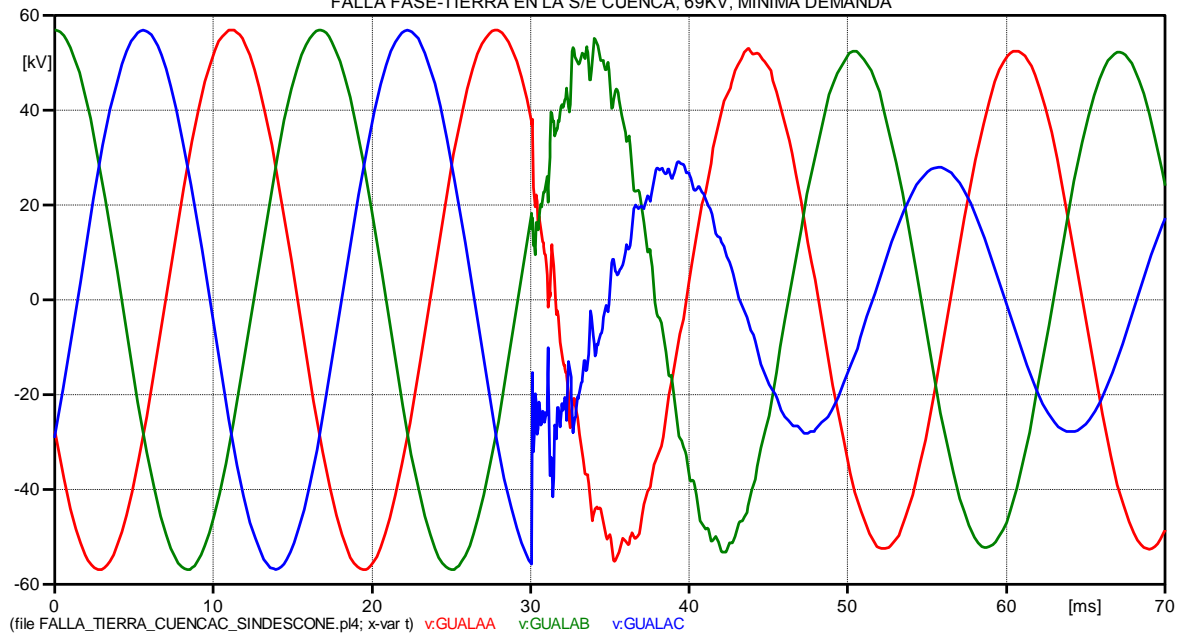


Figura 4. 10 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

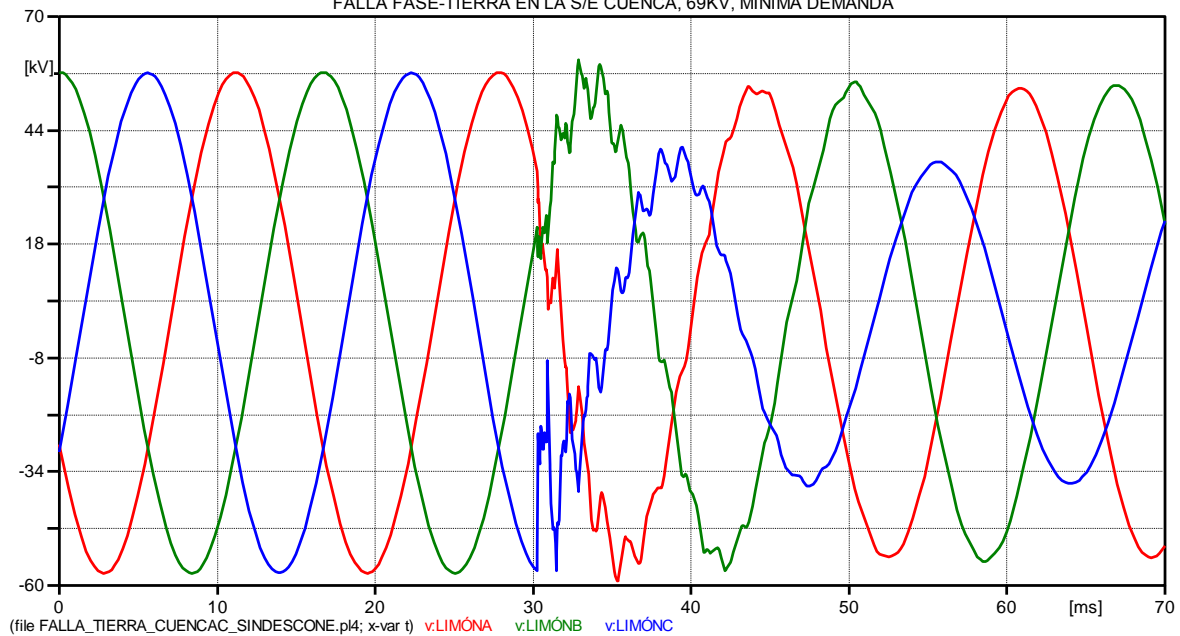


Figura 4. 11 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA
TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA
FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

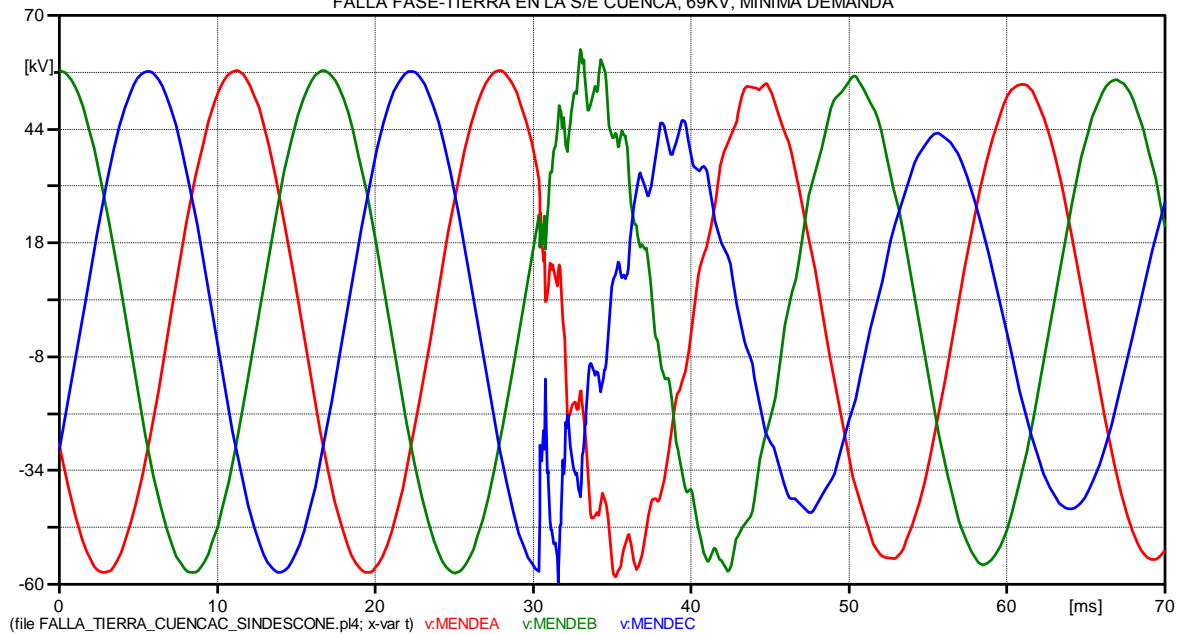


Figura 4. 12 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)

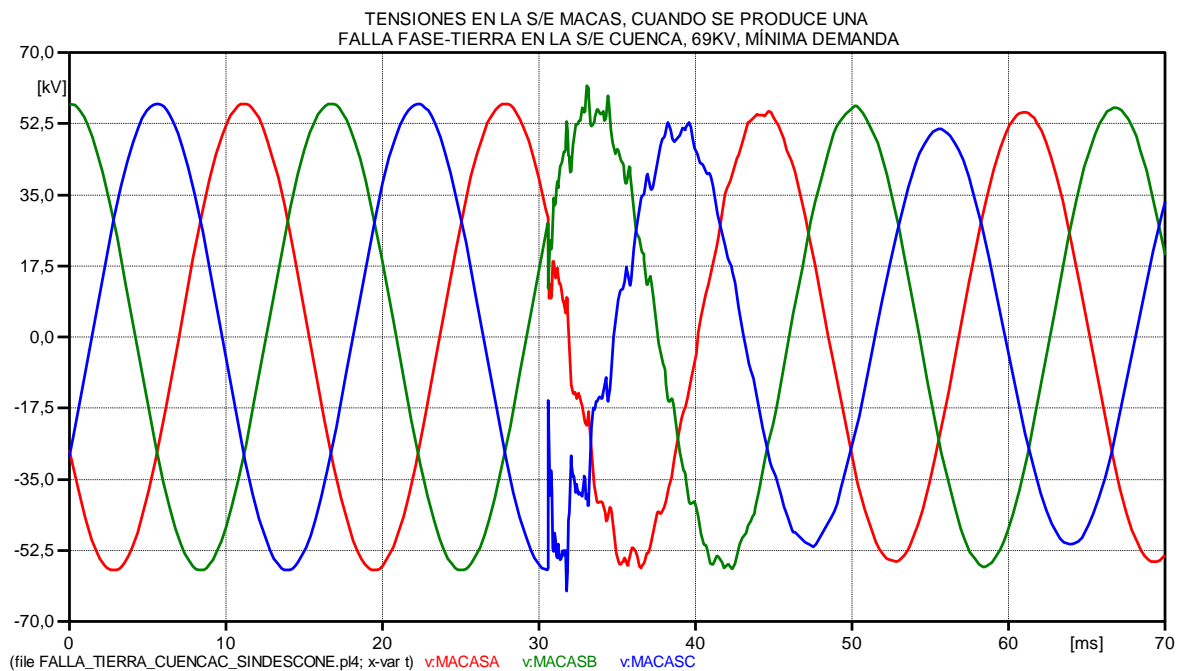


Figura 4. 13 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

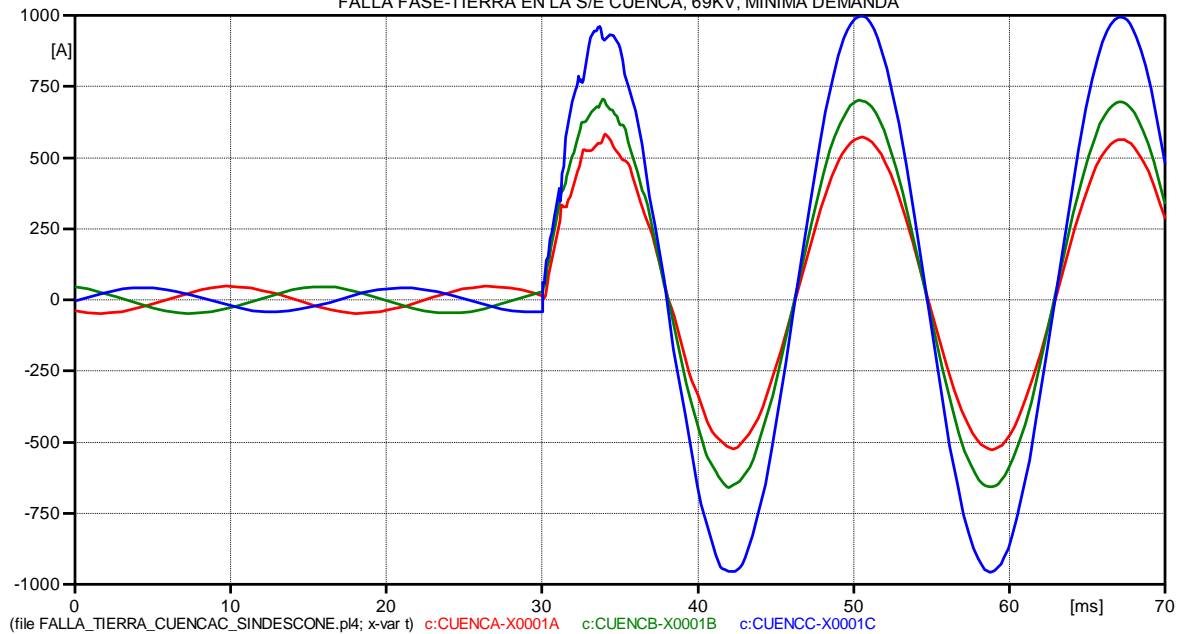


Figura 4. 14 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)

CORRIENTES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

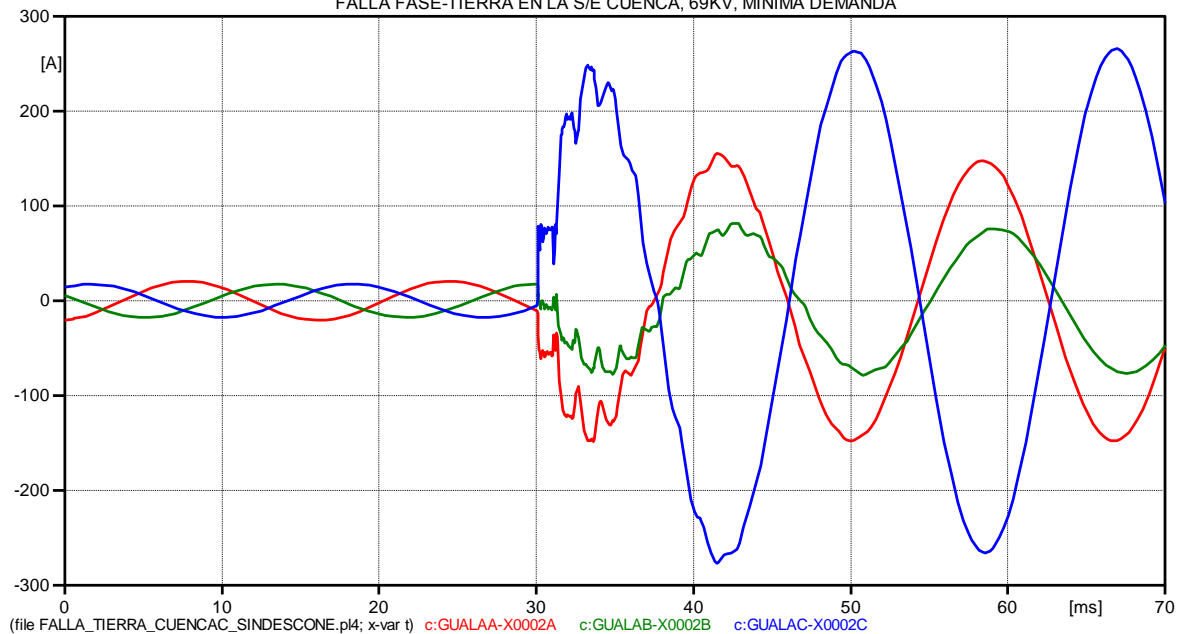


Figura 4. 15 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA
CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA
FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

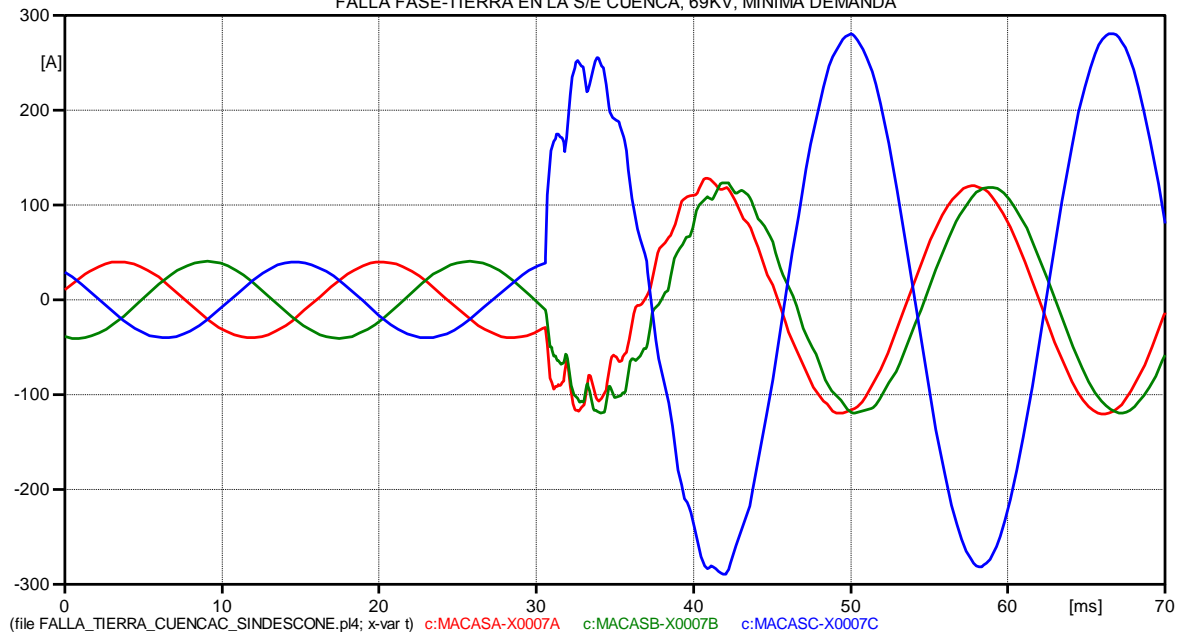


Figura 4. 16 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (69kV)

RESUMEN DE RESULTADOS

Se observa en la Figura 4.9 que el valor de la tensión en la fase C cae a cero, ya que en esta fase se produce la falla fase-tierra. En la subestación Cuenca Rayoloma, se producen las máximas sobretensiones en las fases A y B; además la forma de onda de estas tensiones se ha deformado, con la presencia de armónicos de alta frecuencia.

En las Figuras desde la 4.10 hasta la 4.13, se observa que el valor de la tensión en la fase C crece, conforme crece la distancia desde el punto de falla, esto debido a que la central Hidroabánico se encuentra conectado en el extremo de esta línea, y se produce la máxima sobretensión en esta fase en la subestación Macas; además el contenido de armónicas de frecuencias altas en las ondas de tensión va disminuyendo,

La onda de sobretensión de las fases A y B, desde la subestación Cuenca Rayoloma, disminuye en magnitud hasta la subestación Gualaceo, debido a la atenuación que se produce en la línea; mientras que en las otras subestaciones nuevamente estas tensiones crecen, esto debido a los diferentes coeficientes de transmisión en cada uno de los tramos de la línea de subtransmisión.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Se observa en la Figura 4.14, que la magnitud de la corriente de la fase C en el punto de falla es muy alta (1000A), por lo tanto esta elevación causará un calentamiento en los conductores.

Esta sobrecorriente en la fase C, disminuye en cada subestación posterior al punto de falla, también se observa que en las fases A y B se producen sobrecorrientes.

Los resultados obtenidos tanto de tensiones como de corrientes máximas, en cada una de las subestaciones se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 17 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 69kV. (Demanda mínima)

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA (69kV), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,144	1,187	0,000	581,0	706,6	998,2
GUALACEO	-0,978	0,980	-0,736	155,8	81,7	-276,9
LIMÓN	-1,045	1,067	-1,007	144,9	85,7	-271,3
MÉNDEZ	-1,035	1,106	-1,056	131,8	94,1	-271,4
MACAS	-1,009	1,098	-1,112	125,9	94,4	-265,1

4.2.2.1.1 Falla fase-tierra la subestación Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV.

Considerando que esta simulación se realiza con las cargas conectadas en las subestaciones, se realizan simulaciones utilizando las demandas máximas y mínimas, de los años 2012, 2015 y 2020.

Los resultados de las simulaciones utilizando las demandas mínimas de carga del año 2012 en cada subestación se representarán gráficamente, con su respectivo cuadro de resumen con los valores de la tensión en por unidad y la corriente en amperios, mientras que para las simulaciones de los años 2015 y 2020, se resumirán los resultados en cuadros, ya que las formas de ondas obtenidas son similares a las formas de ondas del año 2012; cambiando simplemente su amplitud, este detalle se tendrá en cuenta para todas las simulaciones realizadas al nivel de tensión de 138kV.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

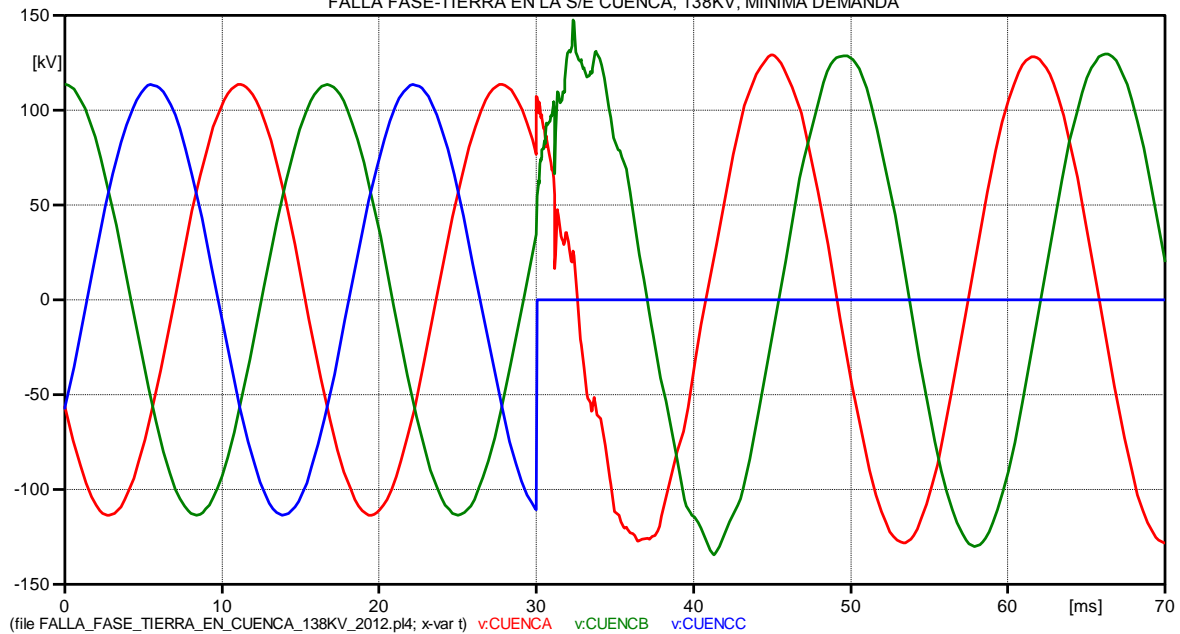


Figura 4. 17 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

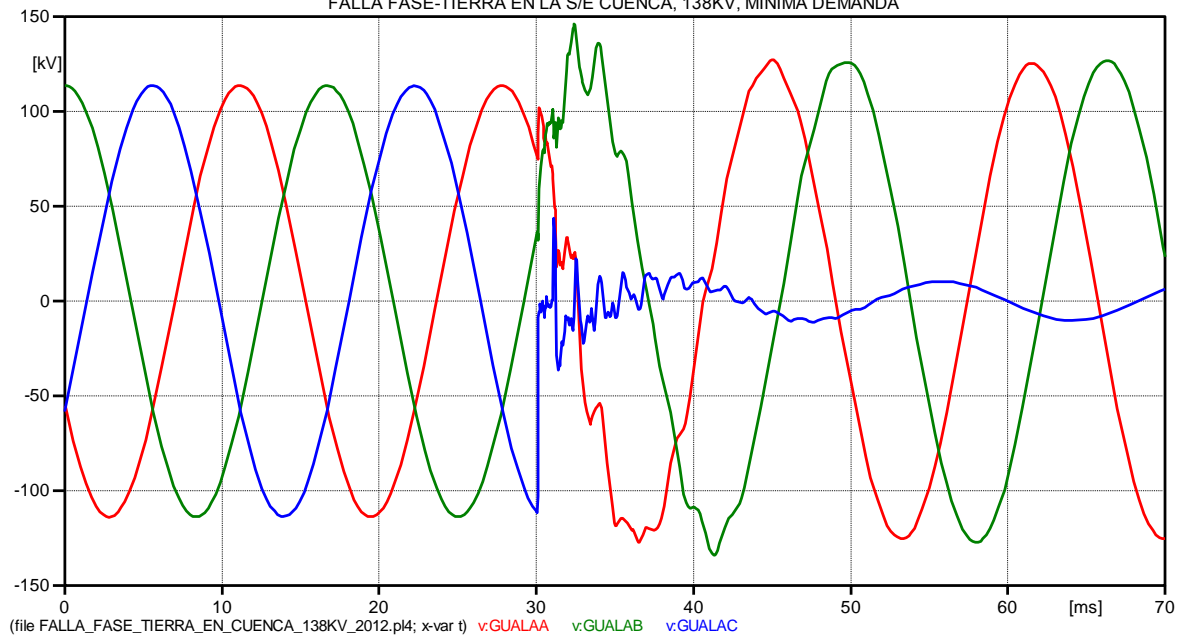


Figura 4. 18 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

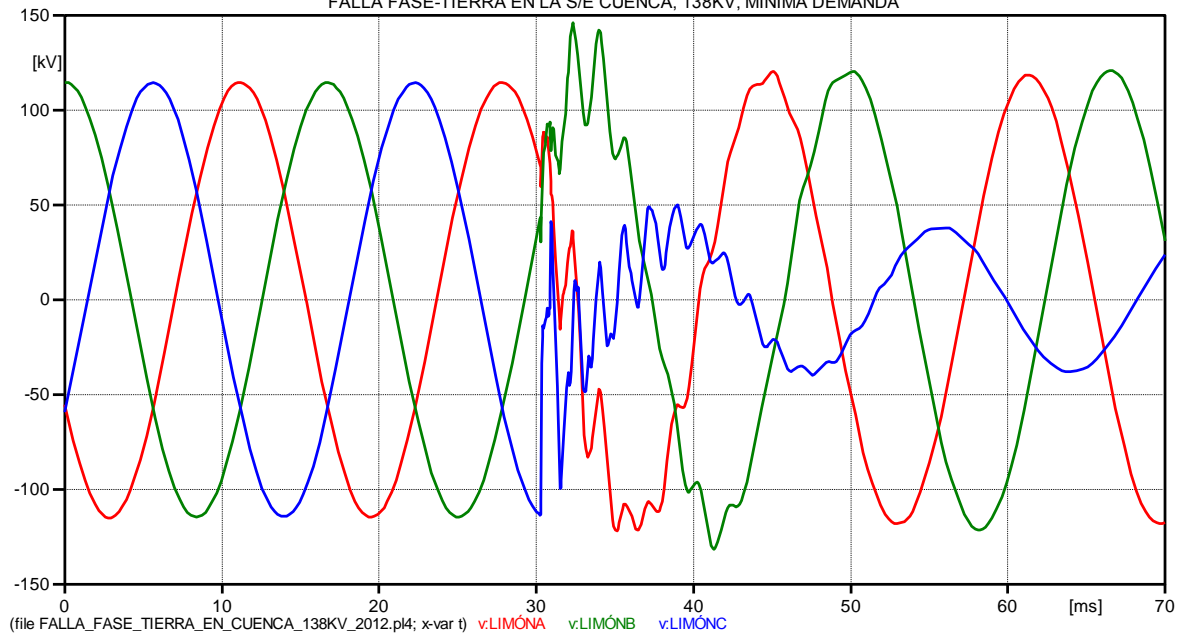


Figura 4. 19 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

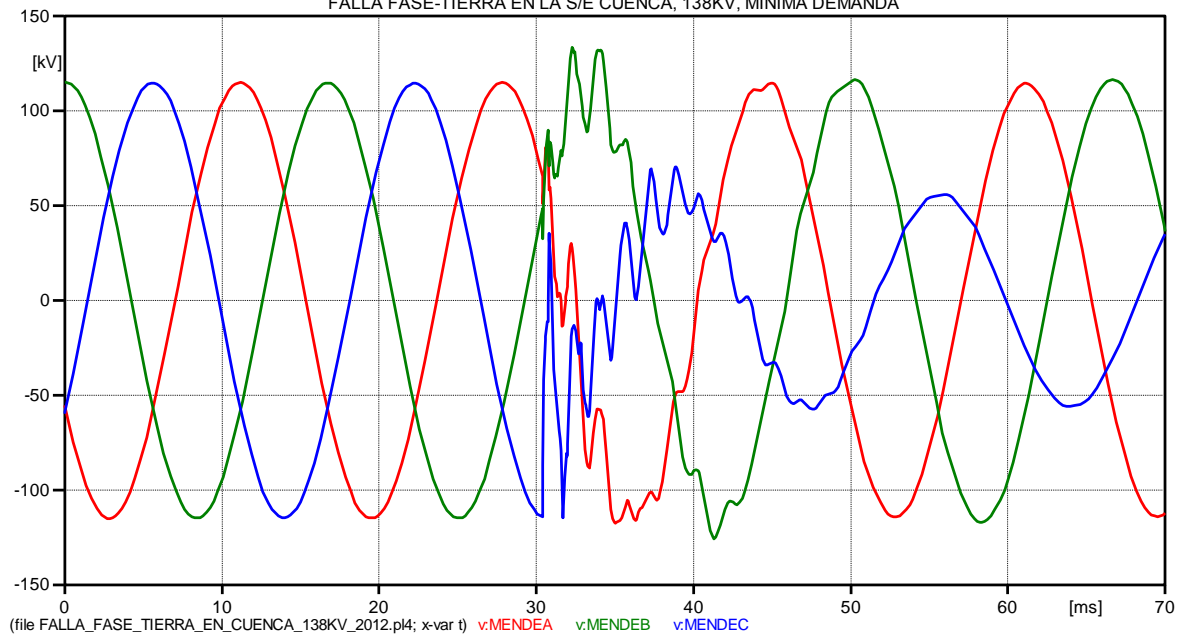


Figura 4. 20 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

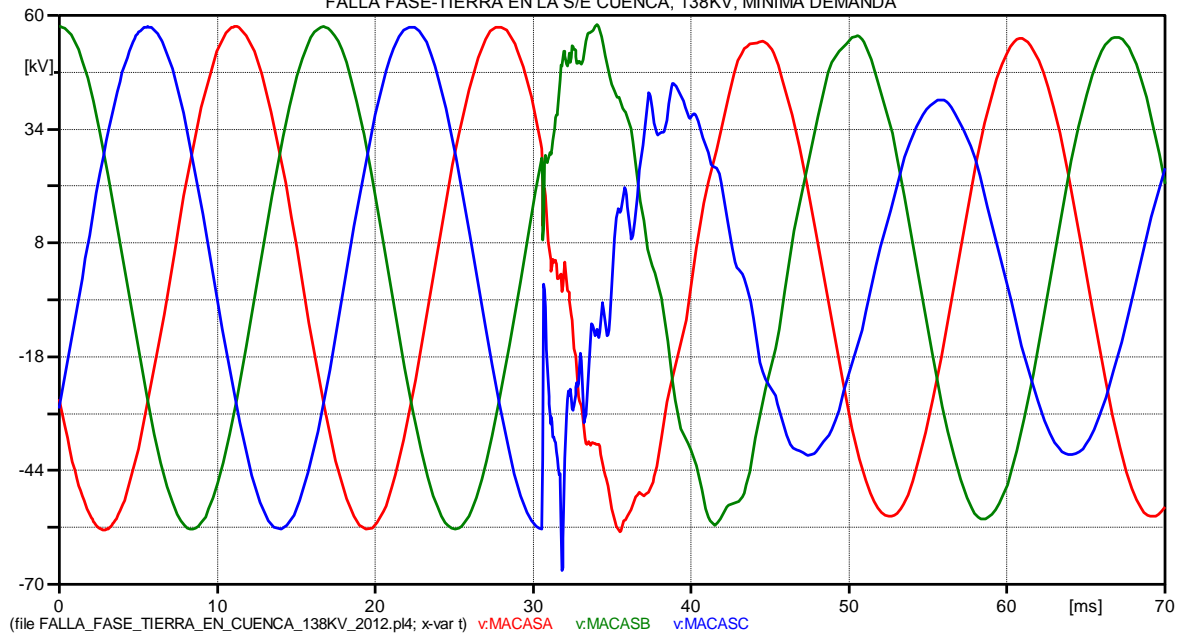


Figura 4. 21 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)

CORRIENTES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

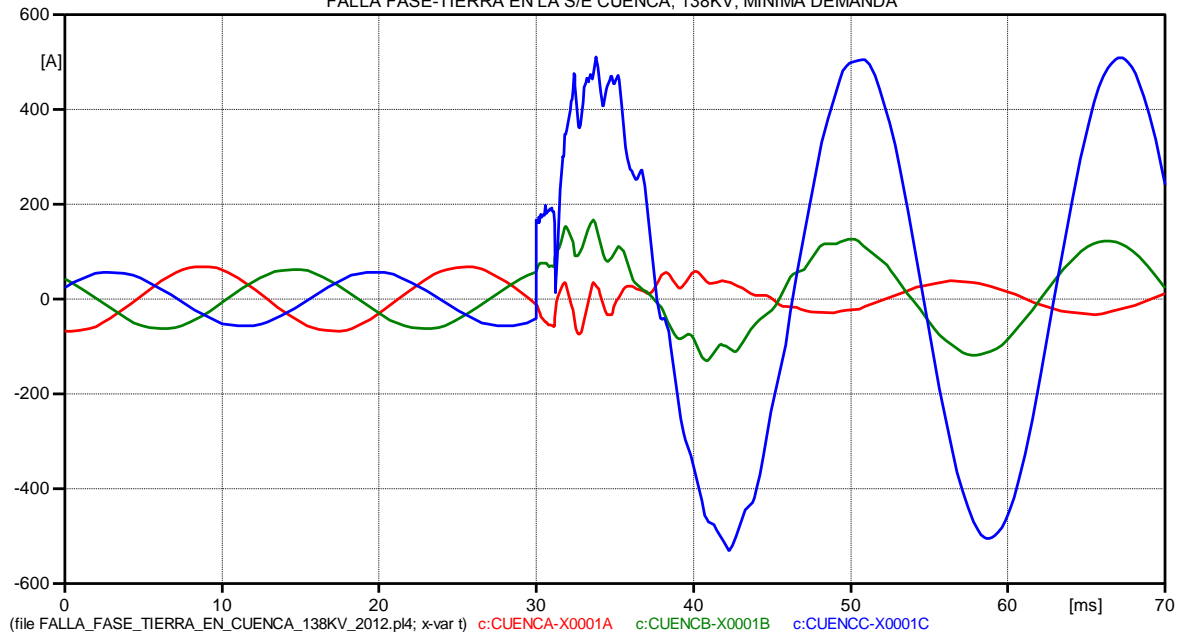


Figura 4. 22 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

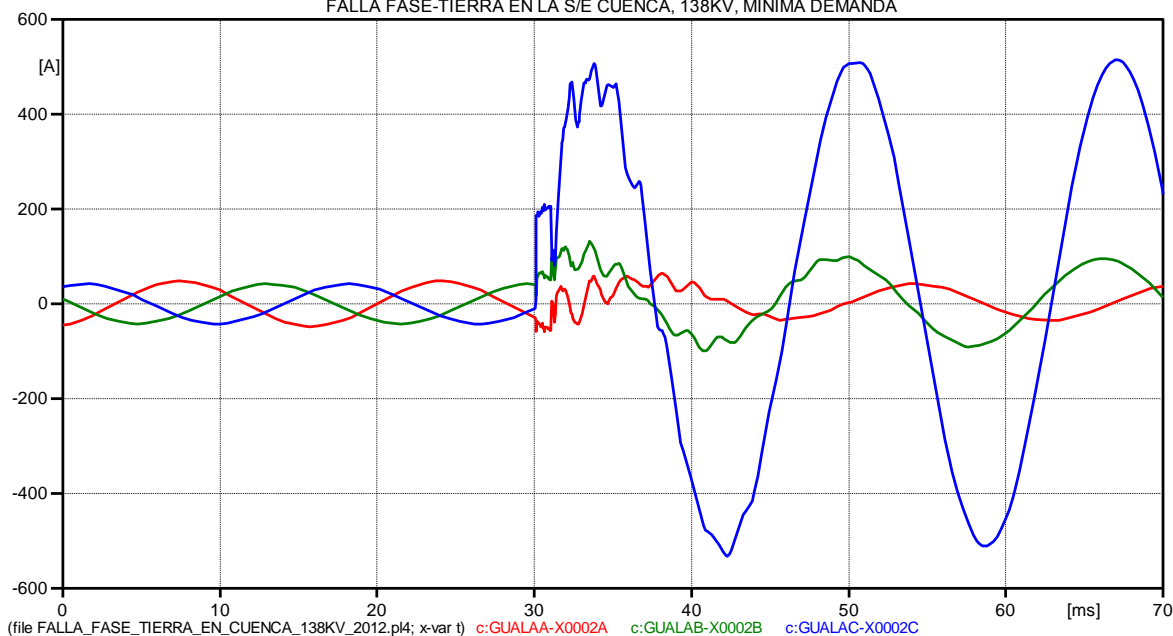


Figura 4. 23 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)

CORRIENTES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

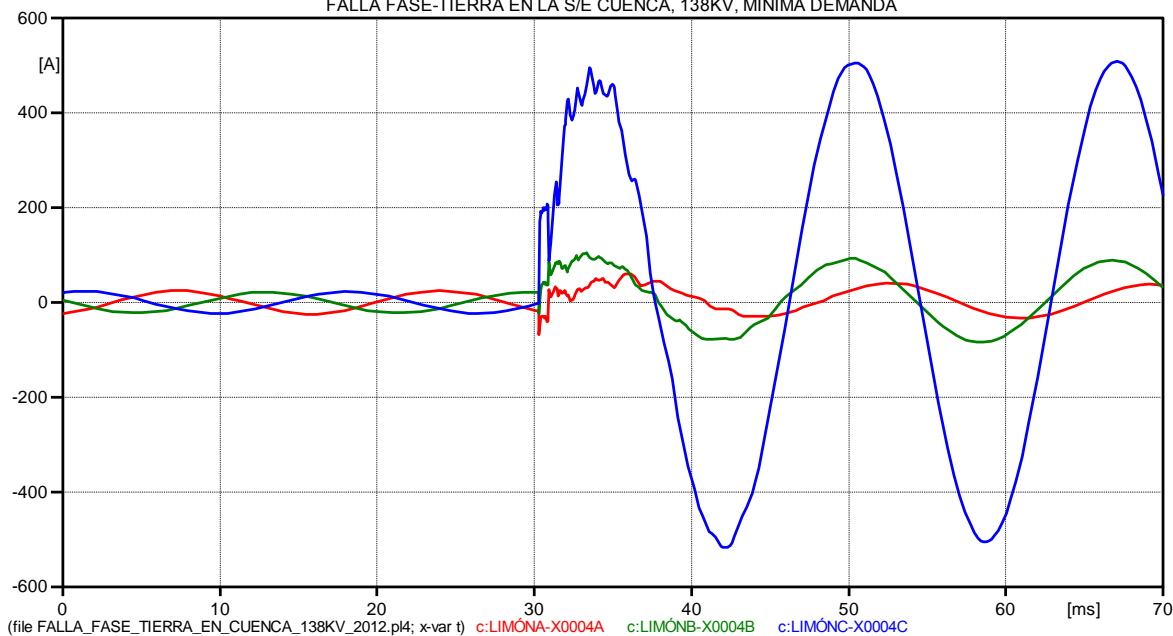


Figura 4. 24 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

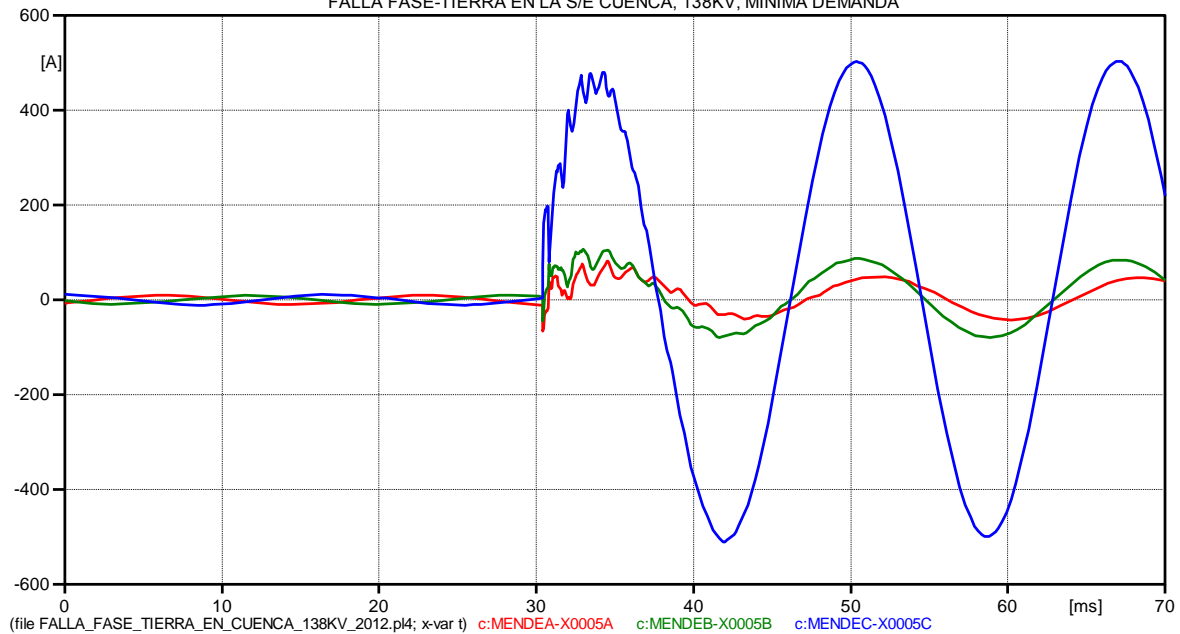


Figura 4. 25 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)

CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

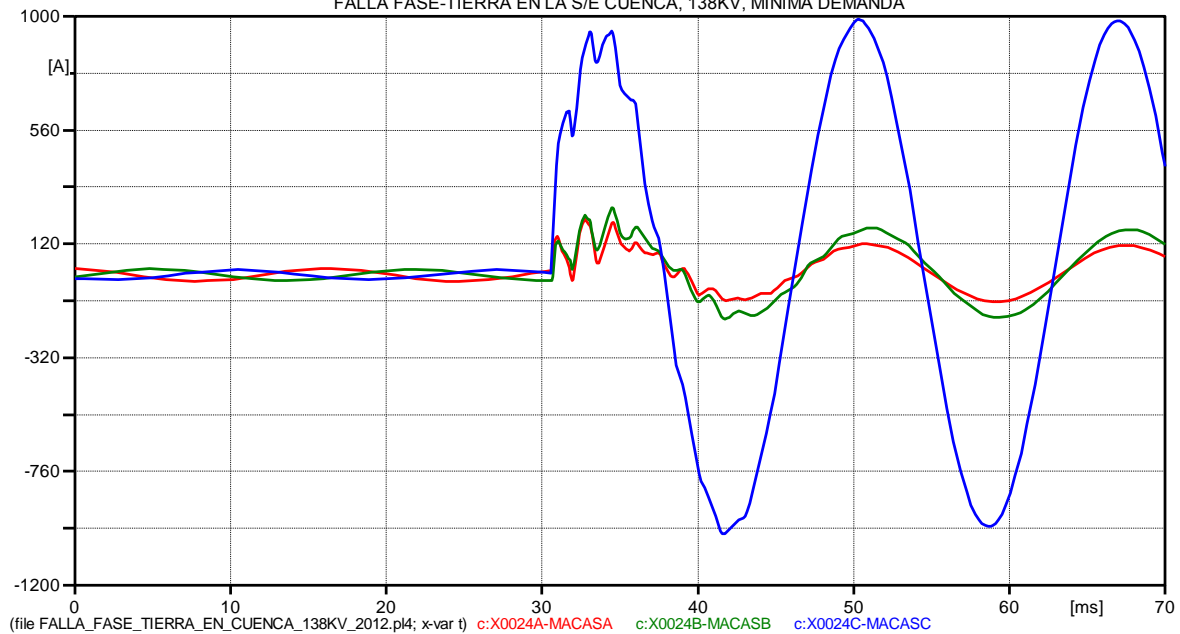


Figura 4. 26 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma (138kV-2012)



RESUMEN DE RESULTADOS

Se observa en la Figura 4.17 que en las fases A y B de la subestación Cuenca Rayoloma, se producen sobretensiones como consecuencia de la falla a tierra en la fase C al nivel de 138kV. En la fase B de la subestación Cuenca Rayoloma, se produce la máxima sobretensión de esta simulación.

En las Figuras desde la 4.18 hasta la 4.20 se observa que la sobretensión de las fases A y B, disminuye su valor en cada subestación posterior al punto de falla; esto debido a la conexión de la central Hidroabánico en el extremo de la línea, por lo tanto en la subestación Méndez se obtienen los valores más bajos de tensión, tanto en la fase B como en la fase A.

En la subestación Macas, la sobretensión en las fases A y B, decrece aún más debido al transformador de potencia 138/69 kV, el cual disminuye la tensión en el lado secundario del transformador. Se observa también que la tensión de la fase C, crece en cada subestación posterior al punto de falla; obteniéndose un mayor valor de tensión en la subestación Macas a 138kV.

En la Figura 4.21 con respecto a la subestación Macas a 69kV, se observa que las sobretensiones han disminuido con respecto a los valores de tensión del lado de alta (138kV), pero estos valores son considerables a este nivel de tensión (69kV).

En las Figuras desde la 4.22 hasta la 4.25, se observa que en la fase C (con fallada), se produce la mayor sobrecorriente en cada una de las subestaciones; siendo el de mayor valor en la subestación Macas 69kV, esto debido al transformador de potencia 138/69kV, ya que este eleva la corriente en el lado de baja tensión.

Se observa también que la corriente de las fases A y B en las subestaciones, ha crecido en valor comparado con las corrientes en funcionamiento normal.

Los valores máximos posteriores a la falla, obtenidos de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:



Cuadro 4. 18 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2012; en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA (138kV-2012)(mínima demanda)						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,147	1,310	0,000	-74,1	167,2	-529,7
GUALACEO	1,130	1,299	0,387	65,2	132,2	-532,7
LIMÓN	-1,081	1,296	-0,882	-67,1	105,0	-517,5
MÉNDEZ	-1,042	1,184	-1,017	81,8	106,2	-510,9
MACAS (69kV)	-1,030	1,028	-1,188	215,6	261,6	-1000,9

De la misma manera se realizó la simulación de la falla fase-tierra en la subestación Cuenca Rayoloma a 138kV, considerando las demandas máximas en cada subestación.

Los resultados obtenidos se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 19 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2012; en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA (138kV-2012)(máxima demanda)						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,142	1,299	0,000	92,5	195,7	-515,3
GUALACEO	-1,141	1,278	0,383	54,5	136,6	-525,1
LIMÓN	-1,090	1,265	-0,888	-62,0	109,7	-511,2
MÉNDEZ	-1,034	1,145	-1,014	82,4	106,0	-507,8
MACAS (69kV)	-1,004	1,006	-1,178	211,0	258,6	-994,7

También se obtienen los resultados de las simulaciones utilizando las demandas de los años 2015 y 2020, tanto para máxima como para mínima demanda en cada subestación; los cuales se resumen en los siguientes cuadros:



Cuadro 4. 20 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2015; en demanda mínima

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA (138kV-2015), demanda mínima						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,165	1,326	0,000	-73,4	193,3	-518,6
GUALACEO	-1,162	1,305	0,380	73,8	155,3	-522,9
LIMÓN	-1,109	1,296	-0,895	70,9	126,7	-511,6
MÉNDEZ	-1,072	1,189	-1,024	96,7	124,0	-505,9
MACAS (69kV)	-1,011	1,030	-1,202	241,1	298,1	-986,6

Cuadro 4. 21 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2015; en demanda máxima

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA (138kV-2015), demanda máxima						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,168	1,316	0,000	104,3	228,4	502,6
GUALACEO	-1,170	1,283	0,376	63,5	162,9	-514,8
LIMÓN	-1,125	1,263	-0,901	61,7	132,9	-503,2
MÉNDEZ	-1,057	1,151	-1,020	95,8	127,4	-501,3
MACAS (69kV)	-0,980	1,009	-1,191	237,5	298,9	-979,8

Cuadro 4. 22 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2020; en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA (138kV-2020), demanda mínima						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,178	1,309	0,000	83,7	212,9	-504,5
GUALACEO	-1,173	1,285	0,374	72,7	169,1	-511,1
LIMÓN	-1,138	1,271	-0,892	68,0	134,8	-503,6
MÉNDEZ	-1,095	1,194	-1,017	91,5	131,0	-501,3
MACAS (69kV)	-0,986	1,039	-1,215	241,9	306,4	-978,7



Cuadro 4. 23 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Cuenca Rayoloma al nivel de 138kV-2020; en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E CUENCA (138kV-2020), demanda máxima						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,178	1,299	0,000	128,50	258,50	492,1
GUALACEO	-1,176	1,266	0,370	61,30	181,00	-505,70
LIMÓN	-1,153	1,232	-0,901	59,00	143,90	-495,30
MÉNDEZ	-1,087	1,156	-1,013	88,70	139,30	-495,60
MACAS (69kV)	-0,957	1,013	-1,202	235,5	311,1	-970,7

4.2.2.2 Falla fase-tierra en la subestación Gualaceo

4.2.2.2.1 Falla fase-tierra en la Subestación Gualaceo a nivel de 69kV.

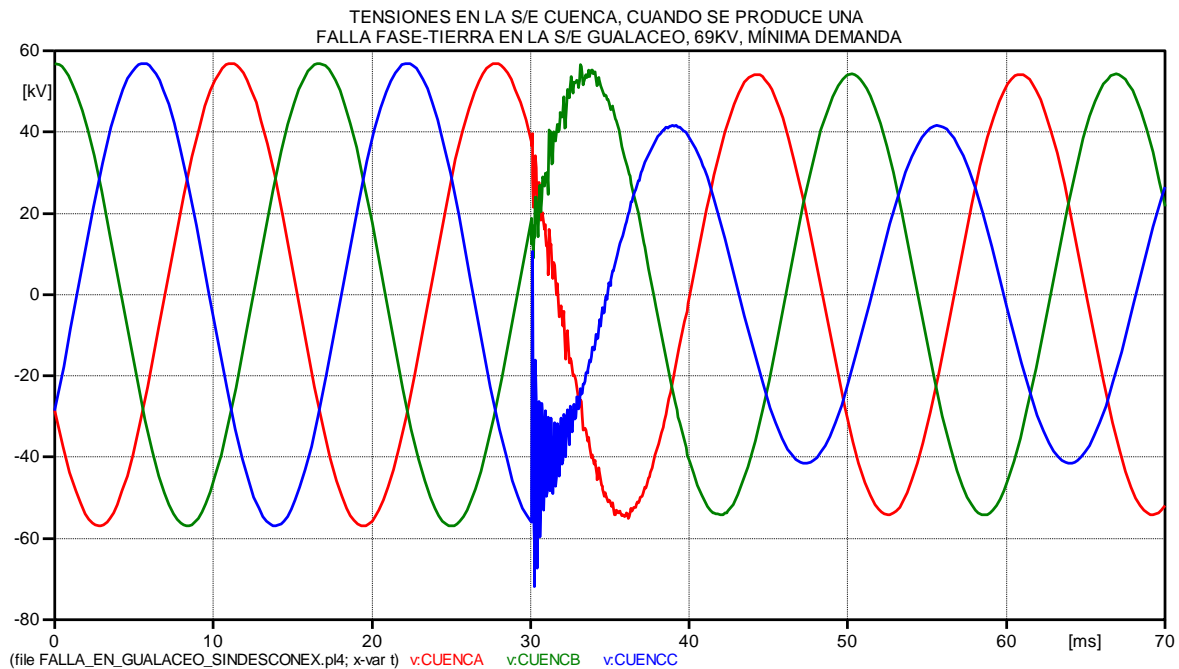


Figura 4. 27 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

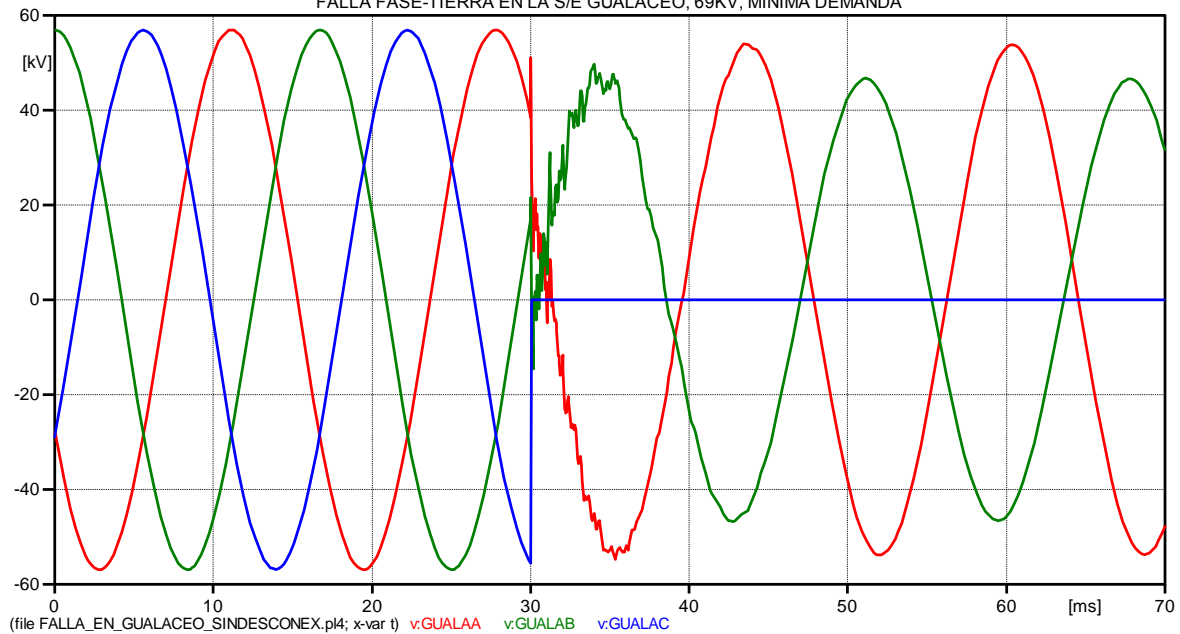


Figura 4. 28 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

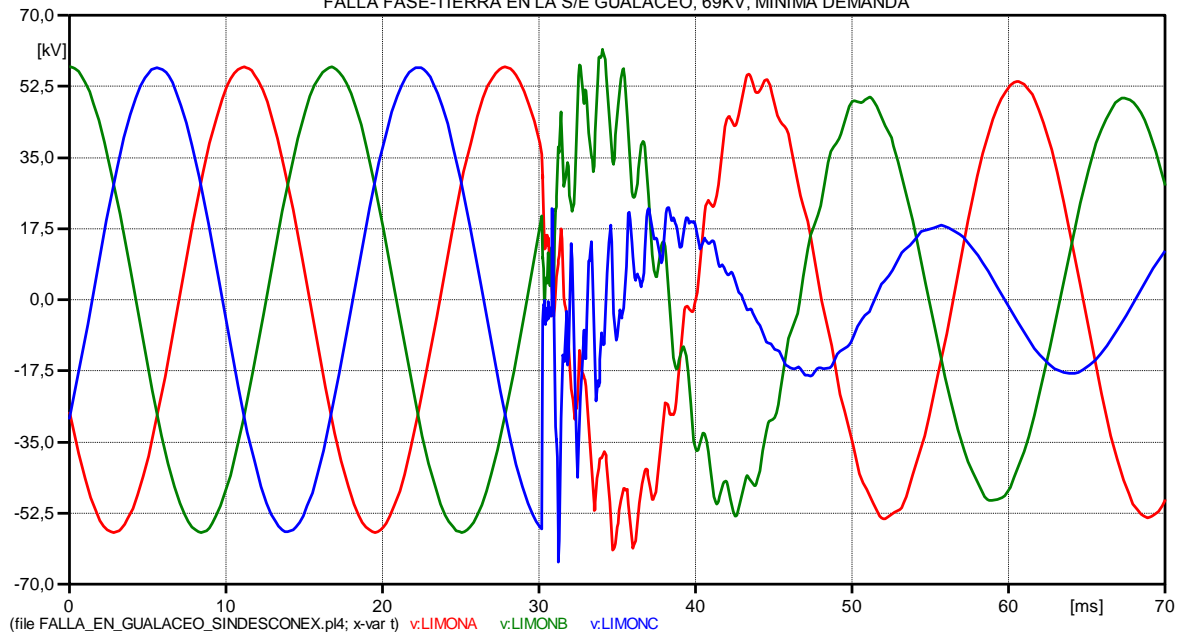


Figura 4. 29 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA
FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

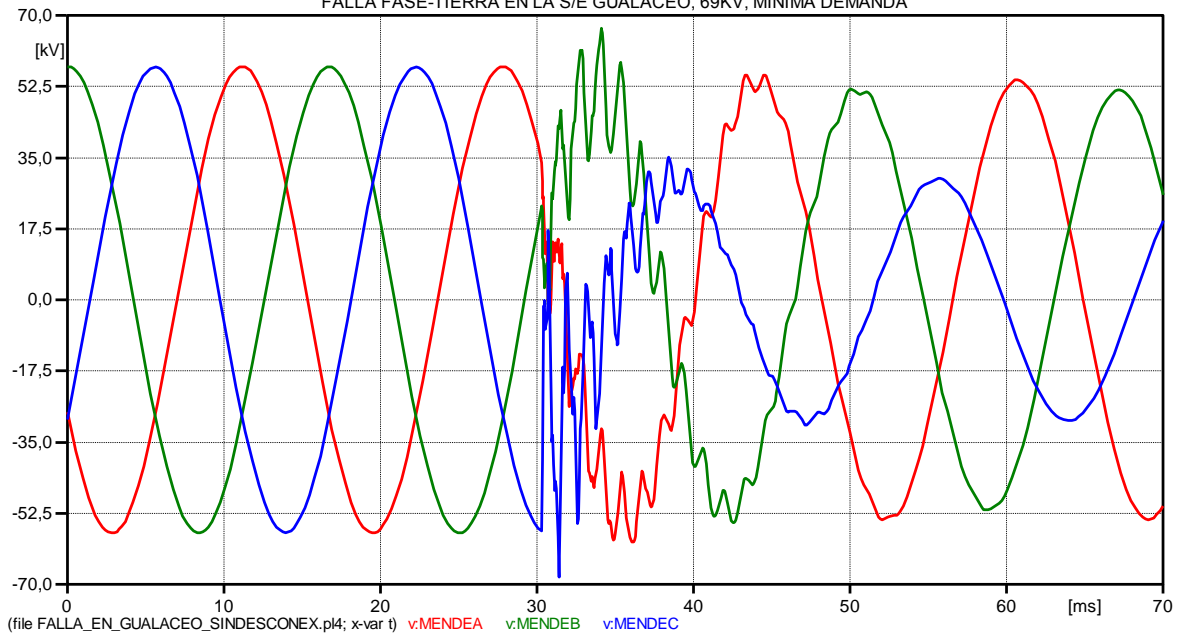


Figura 4. 30 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA
FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

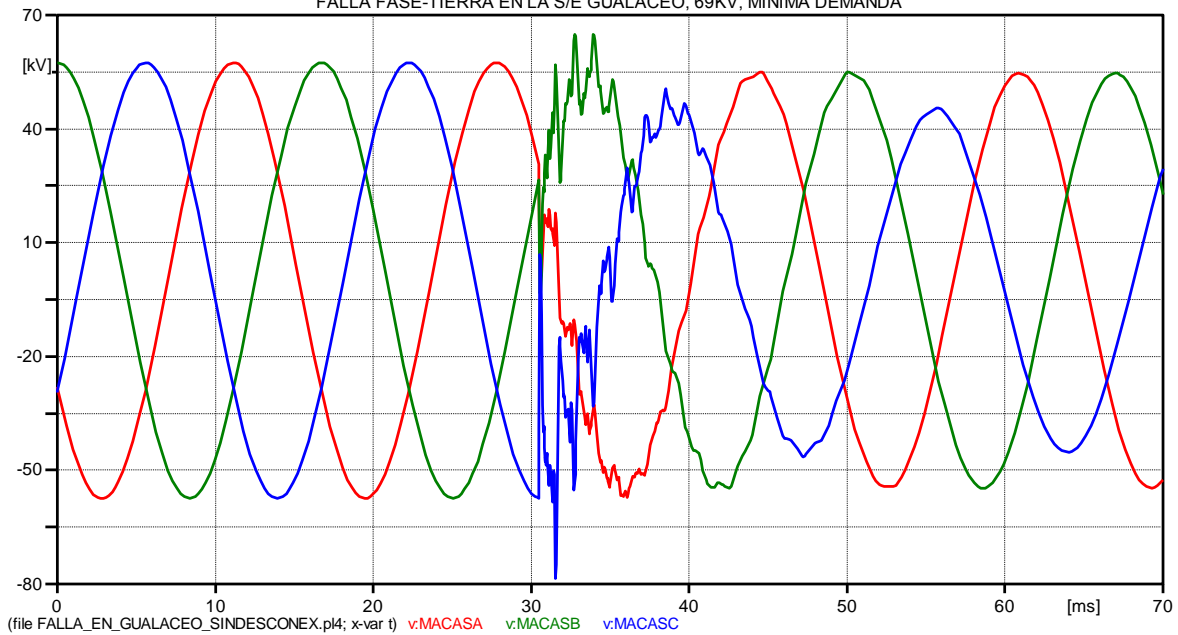


Figura 4. 31 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

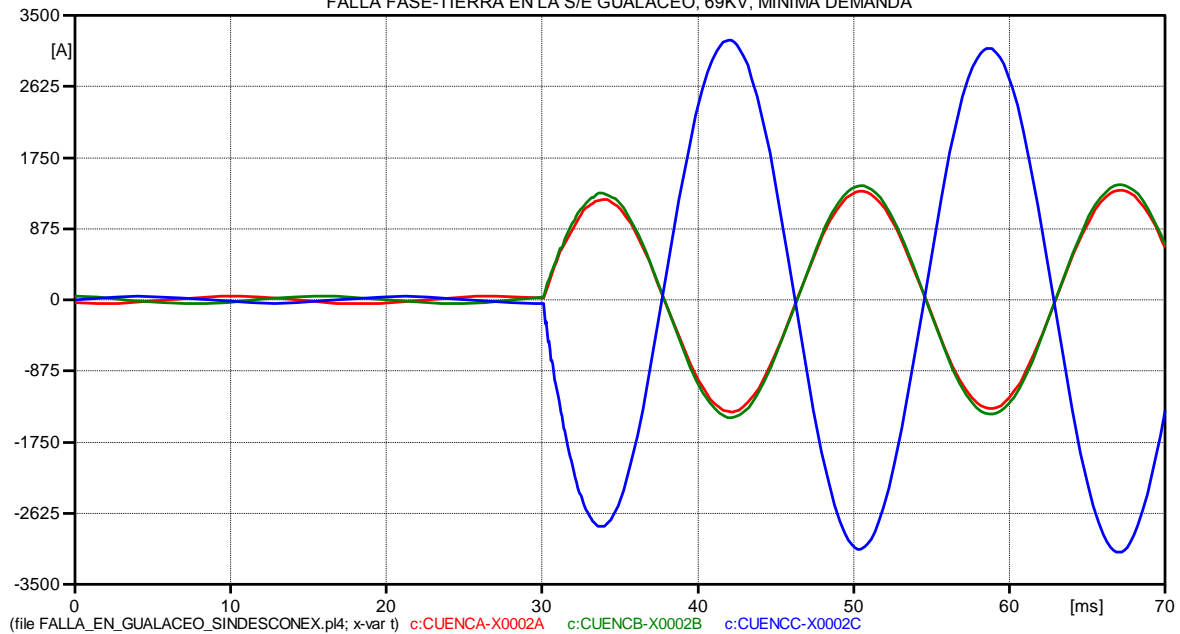


Figura 4. 32 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)

CORRIENTES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

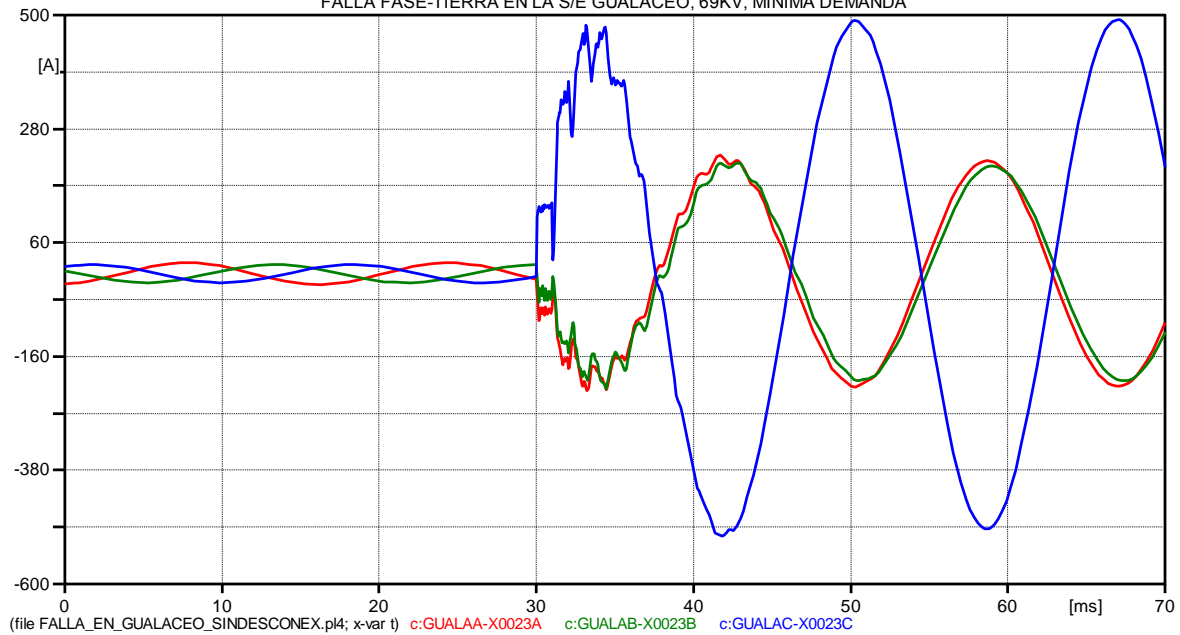


Figura 4. 33 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

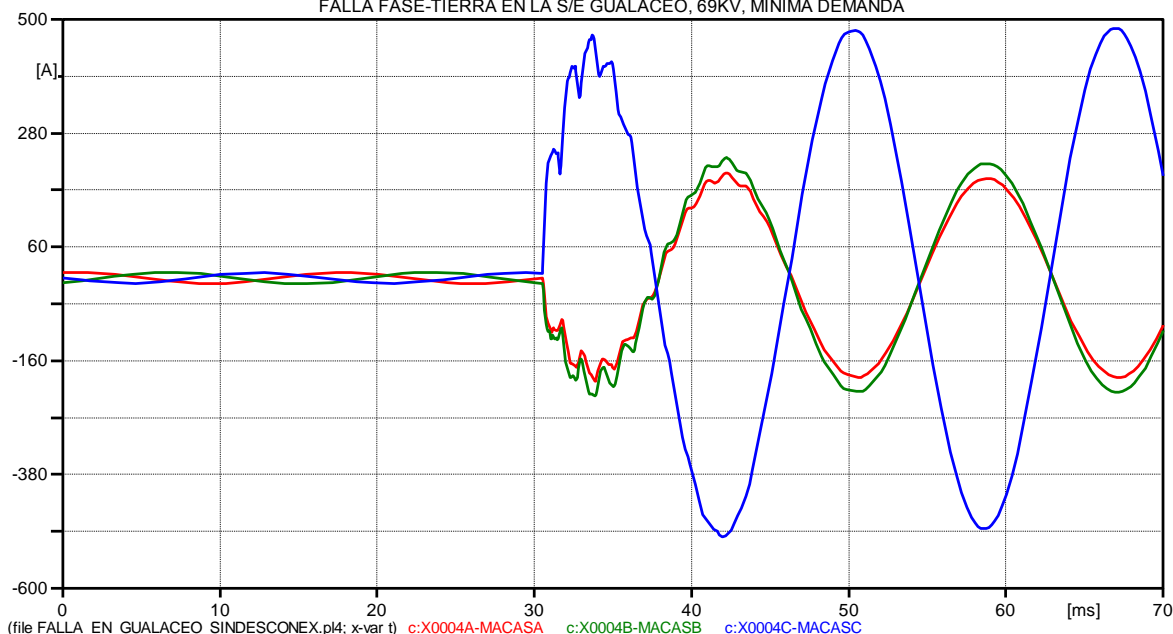


Figura 4. 34 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (69kV)

RESUMEN DE RESULTADOS

Se observa en la Figura 4.27 que en la fase C de la subestación Cuenca Rayoloma, se produce una sobretensión con alto contenido de armónicos de frecuencias altas; mientras que en las fases A y B se introducen pequeños armónicos de alta frecuencia, sin producirse sobretensiones.

En la Figura 4.28 (S/E Gualaceo) la tensión de la fase C cae a cero por la falla a tierra; mientras que en las fases A y B todavía no se producen sobretensiones.

La mayor sobretensión se produce en la fase C de la subestación Macas y tiene un valor negativo, ya que la falla se produce en el momento que esta fase se encontraba en el ciclo negativo; esto se observa en la Figura 4.31.

También la mayor sobrecorriente se produce en la fase C, en el tramo de la línea Cuenca-Gualaceo; este valor de corriente decae en las subestaciones posteriores al punto de falla, ya que el aporte de corriente de falla por la central Hidroabánico es menor porque la falla se encuentra distante con respecto a esta central.

Los resultados de los valores máximos obtenidos después de la simulación de la falla, se resumen en el siguiente cuadro:



Cuadro 4. 24 Sobretensiones y Sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo al nivel de 69kV; en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO (69kV), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-0,979	1,004	-1,276	-1381,5	-1450,1	3195,6
GUALACEO	-0,972	0,884	0,000	228,9	-222,5	-507,5
LIMON	-1,092	1,092	-1,146	216,4	-217,7	-506,0
MENDEZ	-1,059	1,188	-1,208	205,9	227,9	-505,2
MACAS	-1,016	1,153	-1,393	203,4	232,7	-500,9

4.2.2.2.2 Falla fase-tierra en la Subestación Gualaceo al nivel de 138kV.

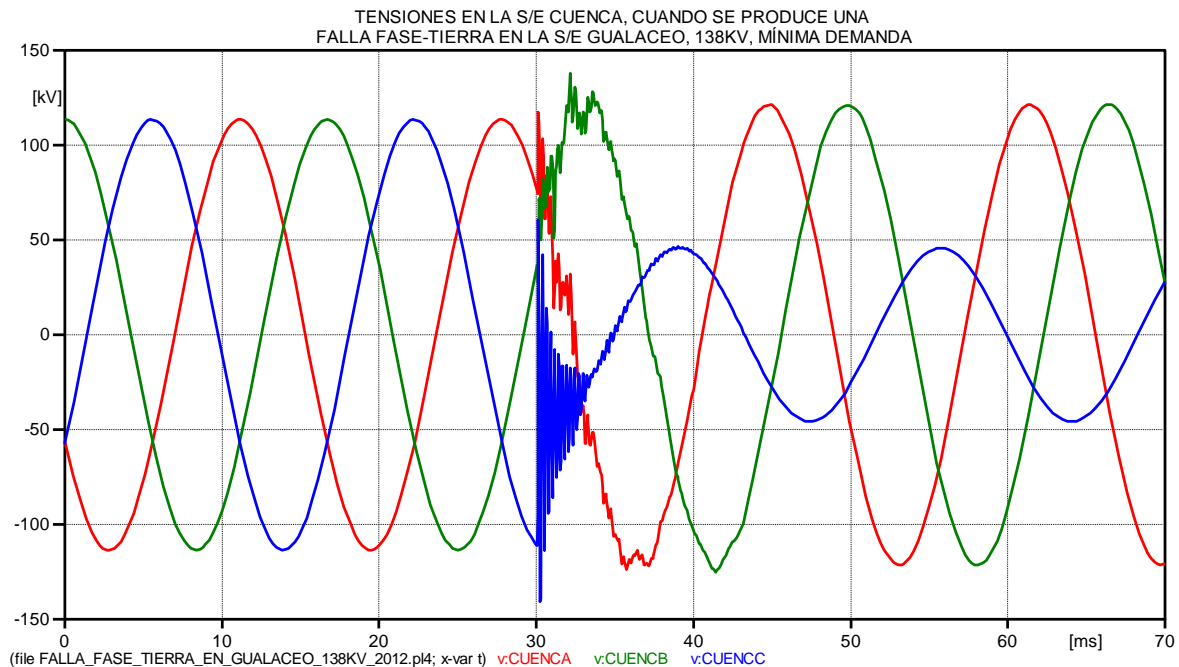


Figura 4. 35 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

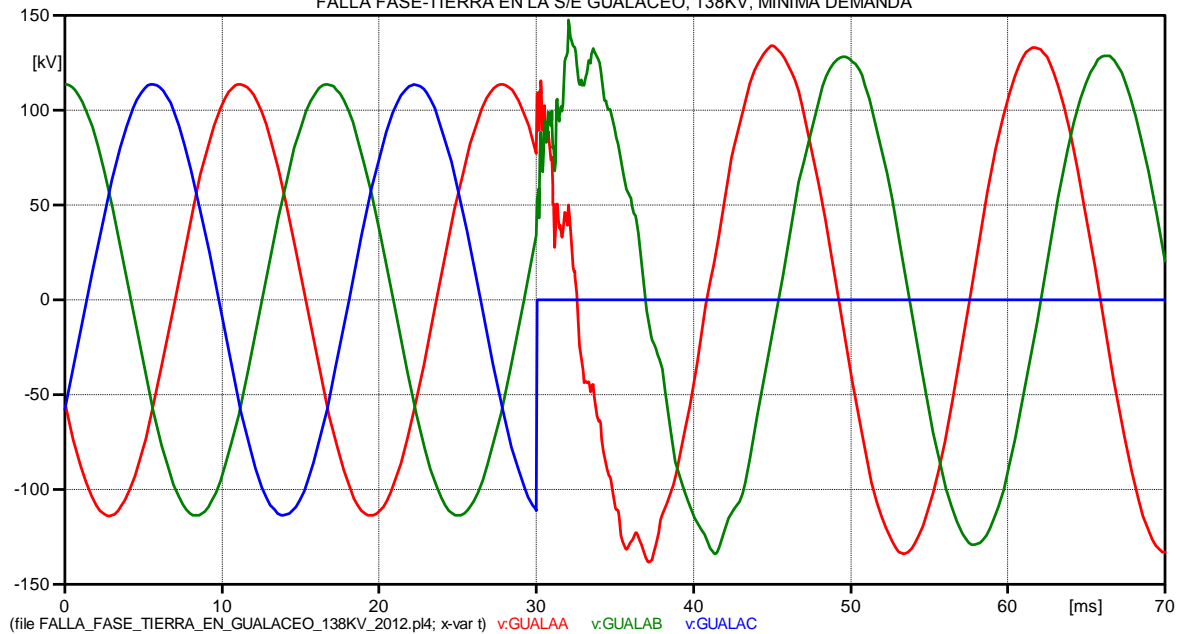


Figura 4. 36 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

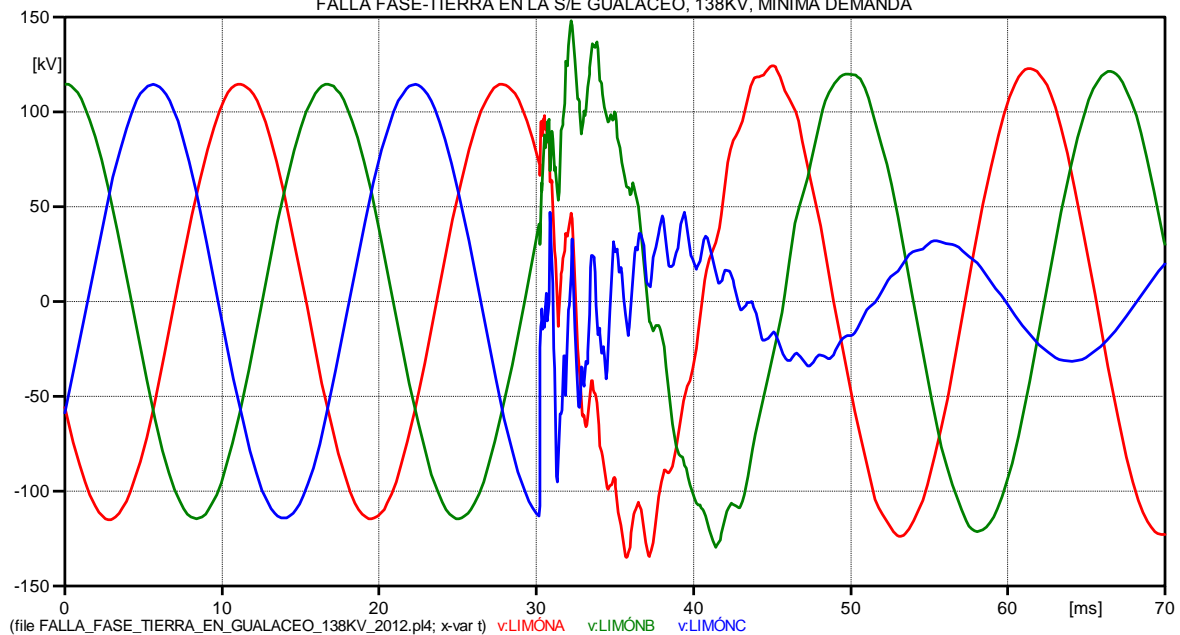


Figura 4. 37 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

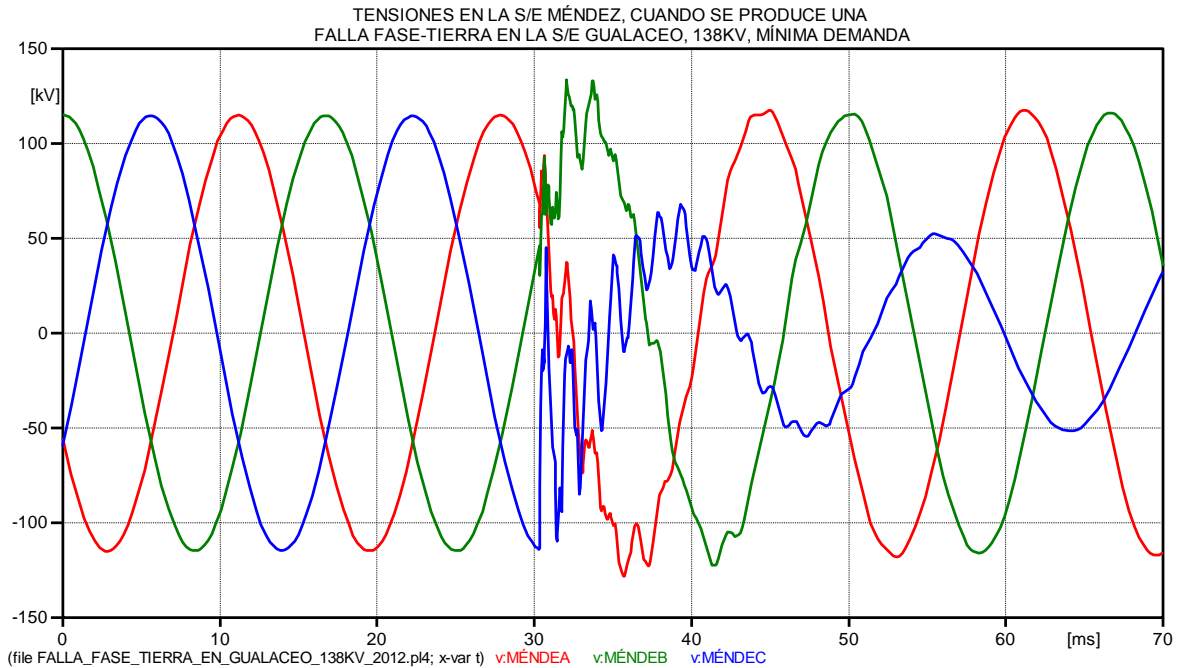


Figura 4. 38 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

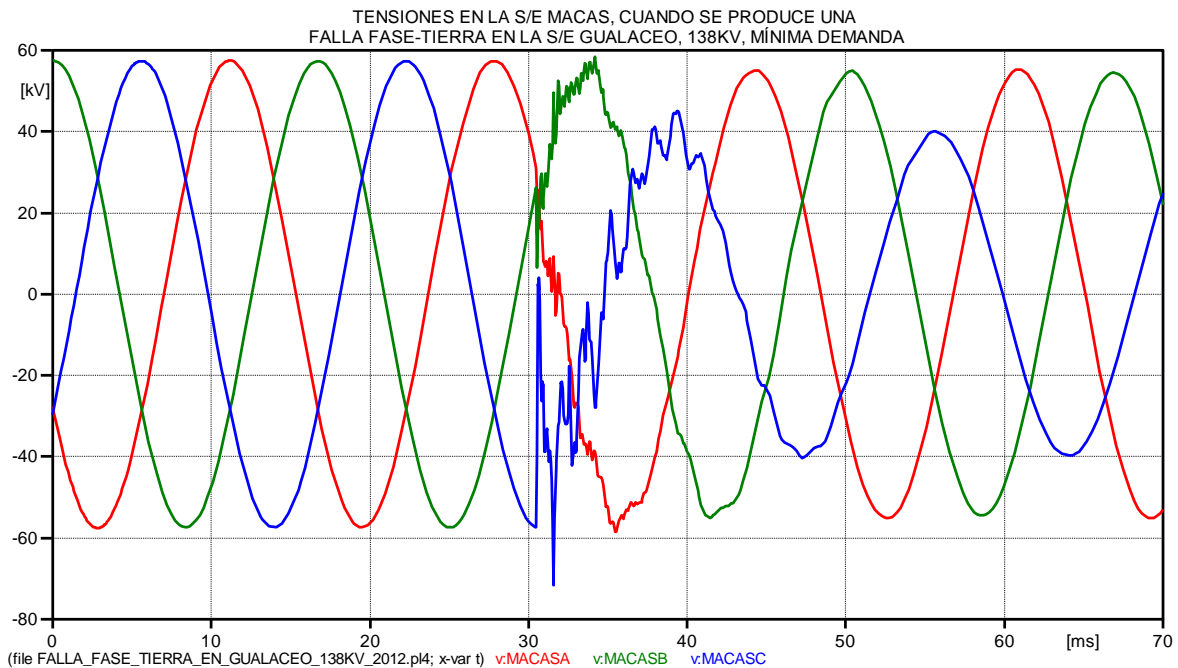


Figura 4. 39 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

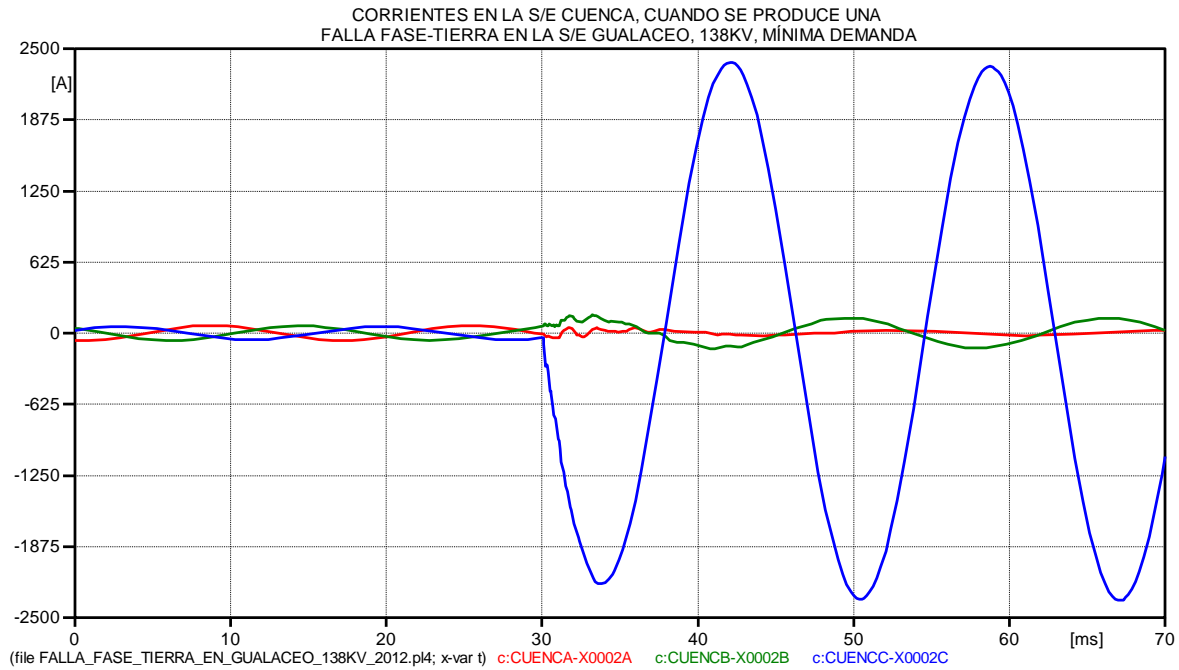


Figura 4. 40 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

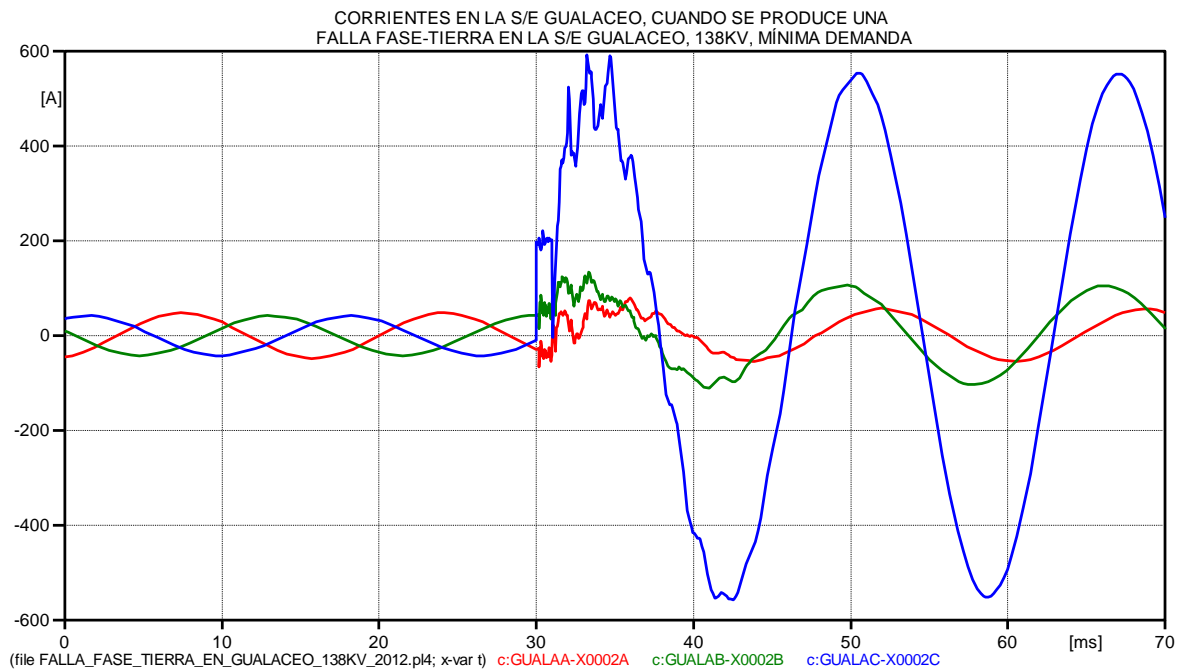


Figura 4. 41 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

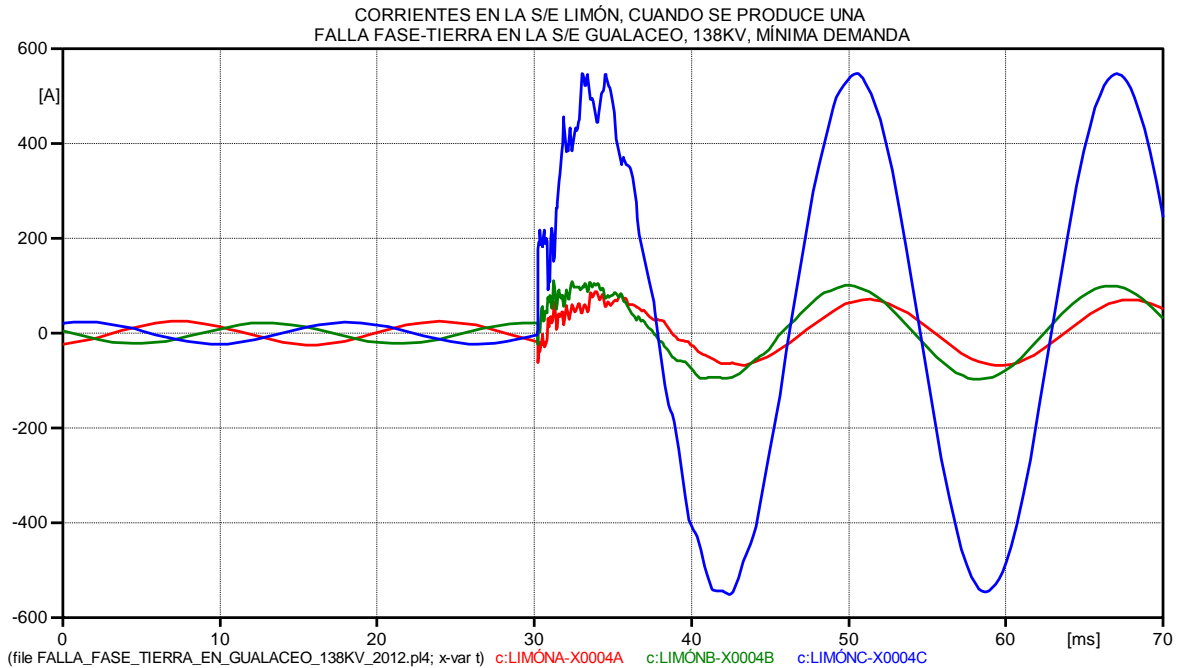


Figura 4. 42 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

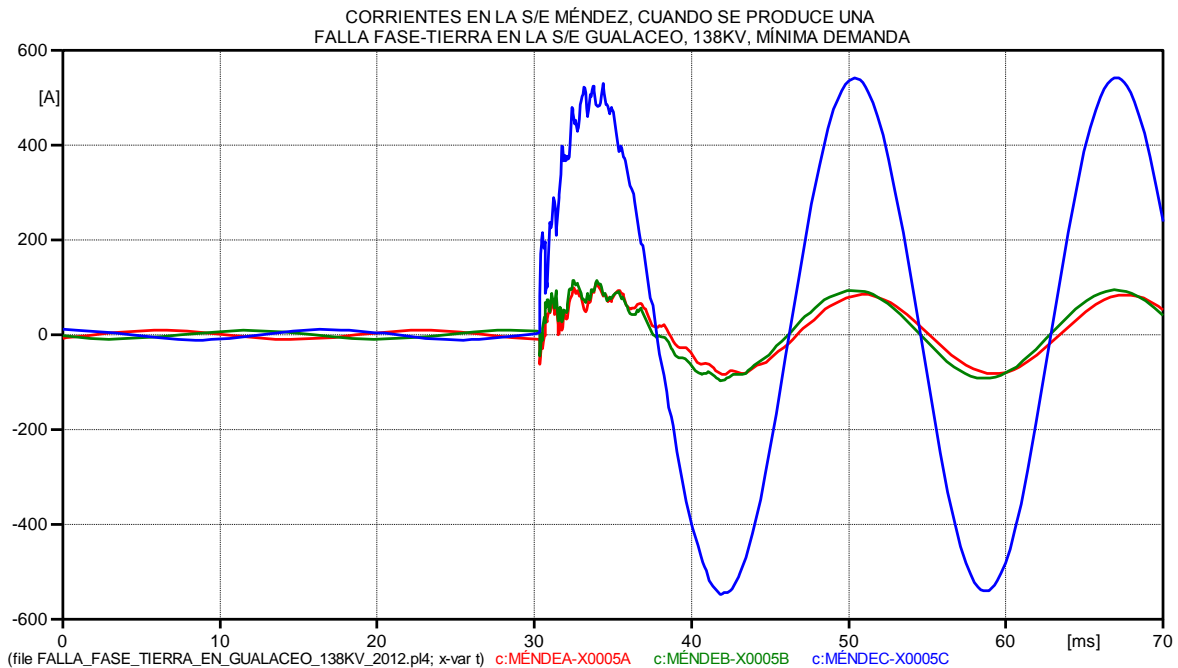


Figura 4. 43 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

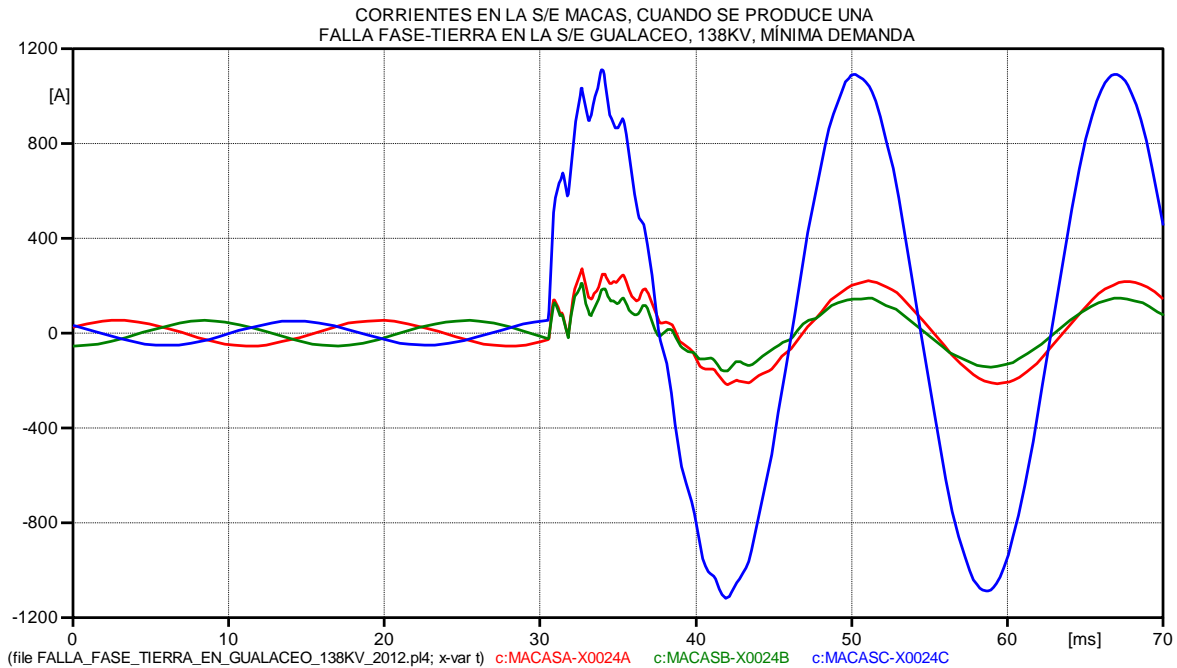


Figura 4. 44 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo (138kV-2012)

RESUMEN DE RESULTADOS

En la Figura 4.35 se observa que en la forma de onda de tensión de la subestación Cuenca Rayoloma, se introducen armónicos de alta frecuencia en las tres fases; siendo de mayor amplitud los de la fase C, de esta manera se produce una sobretensión en ésta fase.

En la Figura 4.36 se observa que en la subestación Gualaceo, se originan las máximas sobretensiones en las fases A y B; mientras que la tensión en la fase C cae a cero debido a la falla fase-tierra.

En las Figuras desde la 4.37 hasta la 4.39, se observa que el valor de tensión de la fase C crece en las subestaciones posteriores al punto de falla, produciéndose la mayor sobretensión en la subestación Macas en esta fase; mientras que la tensión de las fases A y B decrece, obteniéndose en la subestación Macas el mínimo valor en estas fases.

Con respecto a la corriente se observa en las Figuras desde la 4.40 hasta la 4.44, que la máxima sobrecorriente en cada una de las subestaciones se produce en la fase C; del mismo modo se observa que la corriente de las fases A y B se



UNIVERSIDAD DE CUENCA

incrementa en cada una de las subestaciones, siendo este incremento de corriente no tan grande como en la fase C.

El transformador de la subestación Macas de 138/69kV, hace que la corriente se eleve considerablemente en la subestación Macas al nivel de 69kV. Se debe tener mucho en cuenta este transformador, ya que las sobretensiones y las sobrecorrientes de un lado del transformador cambian drásticamente en el otro lado, dependiendo de la relación de transformación de este.

En el siguiente cuadro se resumen los valores máximos obtenidos en esta simulación, después de la falla:

Cuadro 4. 25 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2012, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO (138kV-2012), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,099	1,225	-1,249	-68,5	158,6	2378,6
GUALACEO	-1,228	1,309	0,000	78,9	133,7	592,4
LIMÓN	-1,197	1,312	-0,843	87,6	110,4	-551,7
MÉNDEZ	-1,139	1,183	-0,974	107,8	115,2	-548,2
MACAS (69kV)	-1,040	1,035	-1,270	278,4	242,1	-1087,0

Cuadro 4. 26 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2012, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO (138kV-2012), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,086	1,208	-1,243	92,5	184,8	2376,4
GUALACEO	-1,227	1,286	0,000	70,7	138,1	589,8
LIMÓN	-1,189	1,283	-0,849	83,4	113,9	-547,7
MÉNDEZ	-1,119	1,163	-0,975	107,6	115,7	-543,2
MACAS (69kV)	-1,020	1,019	-1,261	273,4	236,6	1084,2

Considerando las demandas proyectadas para los años 2015 y 2020, se obtienen los siguientes resultados pos falla, que se resumen en los siguientes cuadros:



Cuadro 4. 27 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2015, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO (138kV-2015), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,097	1,231	-1,284	-73,4	176,5	2674,1
GUALACEO	-1,262	1,298	0,000	86,8	145,0	585,6
LIMÓN	-1,226	1,322	-0,859	96,0	121,2	-546,5
MÉNDEZ	-1,115	1,189	-0,981	119,8	125,9	-543,7
MACAS (69kV)	-1,023	1,021	-1,251	295,4	261,1	-1079,9

Cuadro 4. 28 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2015, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO (138kV-2015), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,098	1,215	-1,278	104,3	207,9	2671,8
GUALACEO	-1,256	1,277	0,000	81,2	152,0	580,2
LIMÓN	-1,214	1,291	-0,864	93,3	127,9	542,8
MÉNDEZ	-1,101	1,162	-0,981	119,3	129,5	-537,4
MACAS (69kV)	-1,001	1,005	-1,241	291,3	263,2	1072,5

Cuadro 4. 29 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2020, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO (138kV-2020), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,087	1,149	-1,307	83,70	195,50	3107,90
GUALACEO	-1,268	1,257	0,000	94,20	154,80	574,3
LIMÓN	-1,226	1,306	-0,871	97,60	125,70	-543,20
MÉNDEZ	-1,123	1,196	-0,975	122,20	130,20	-537,40
MACAS (69kV)	-0,991	1,006	-1,202	295,8	273,8	-1071,7



Cuadro 4. 30 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2020, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E GUALACEO (138kV-2020), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,085	1,134	-1,300	-128,8	236,10	3103,10
GUALACEO	-1,257	1,232	0,000	85,30	165,40	567,4
LIMÓN	-1,205	1,269	-0,877	92,60	134,90	-537,50
MÉNDEZ	-1,109	1,160	-0,974	121,50	135,80	-531,30
MACAS (69kV)	-0,970	0,985	-1,188	292,1	279,5	1060,1

4.2.2.3 Falla fase-tierra en la subestación Limón

4.2.2.3.1 Falla fase-tierra en la Subestación Limón a nivel de 69kV.

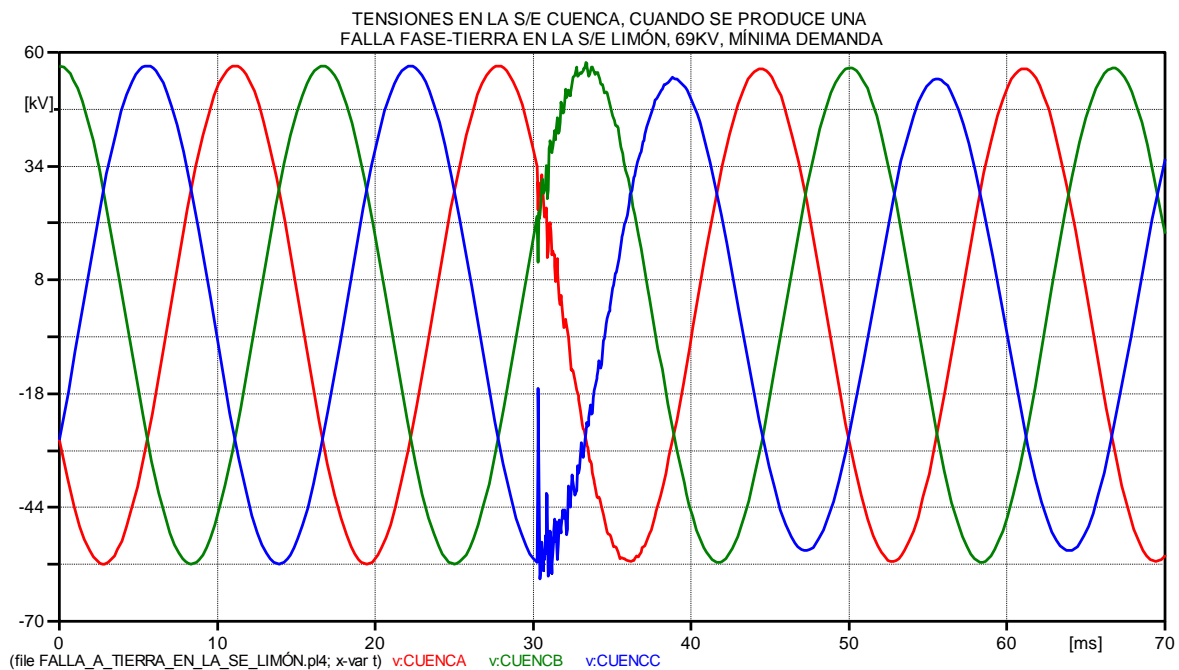


Figura 4. 45 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

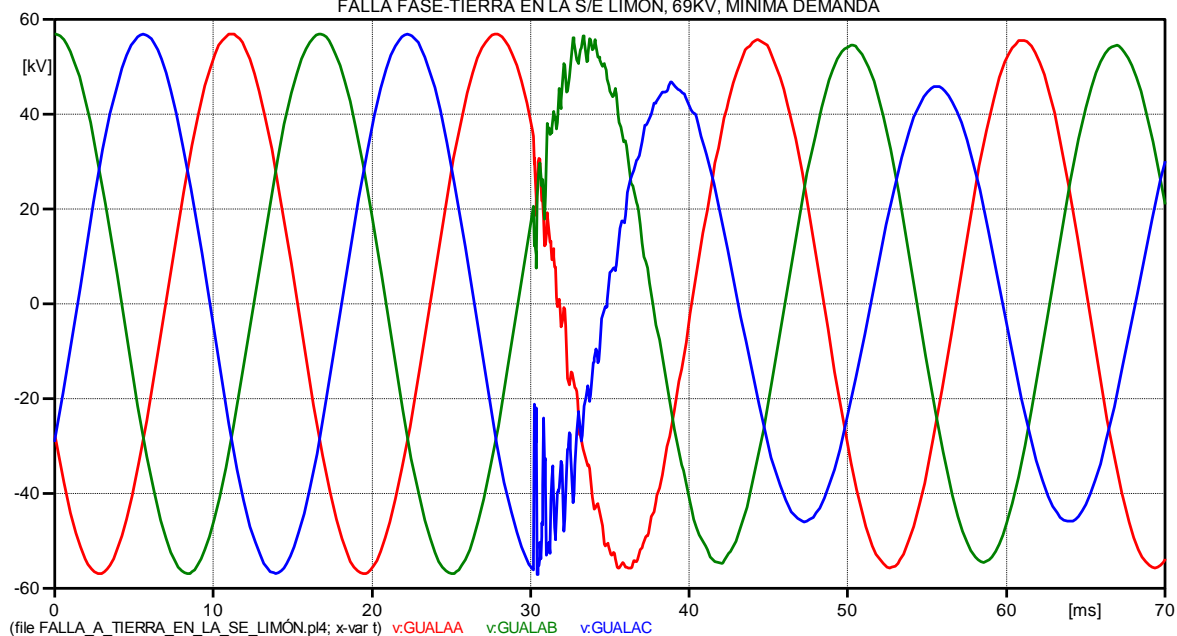


Figura 4. 46 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

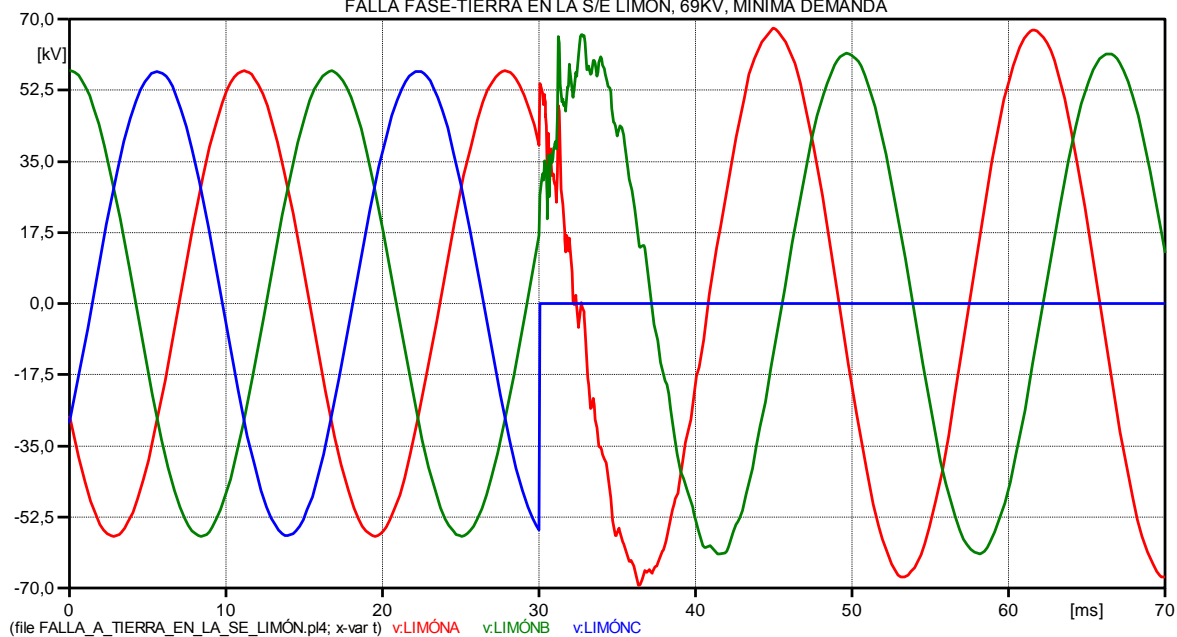


Figura 4. 47 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

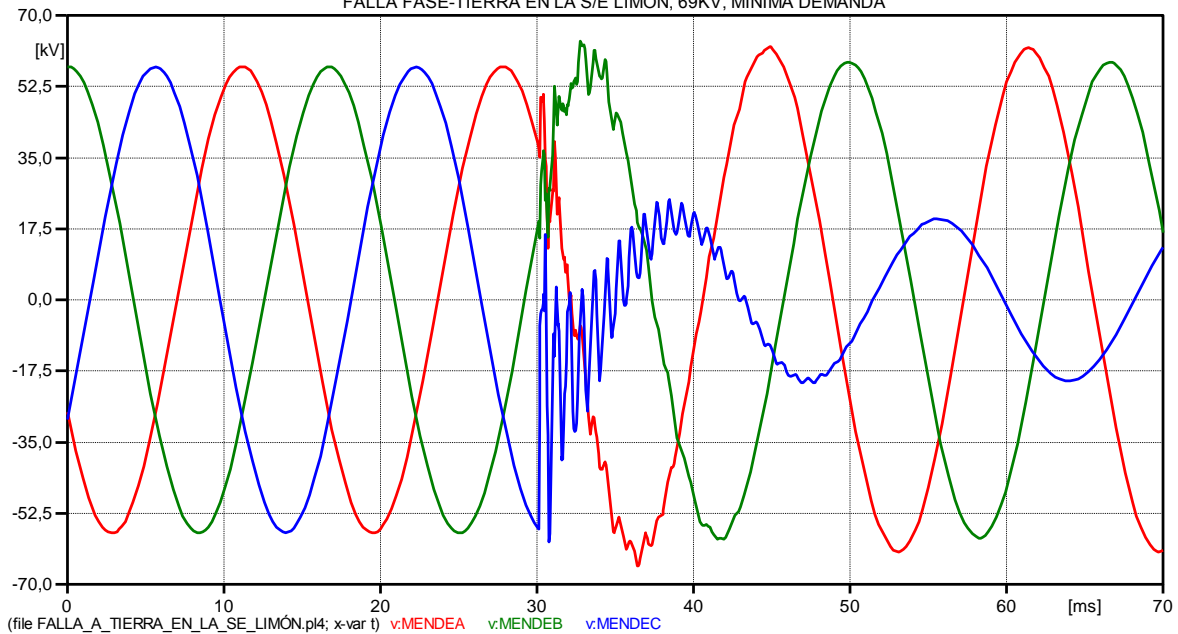


Figura 4. 48 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

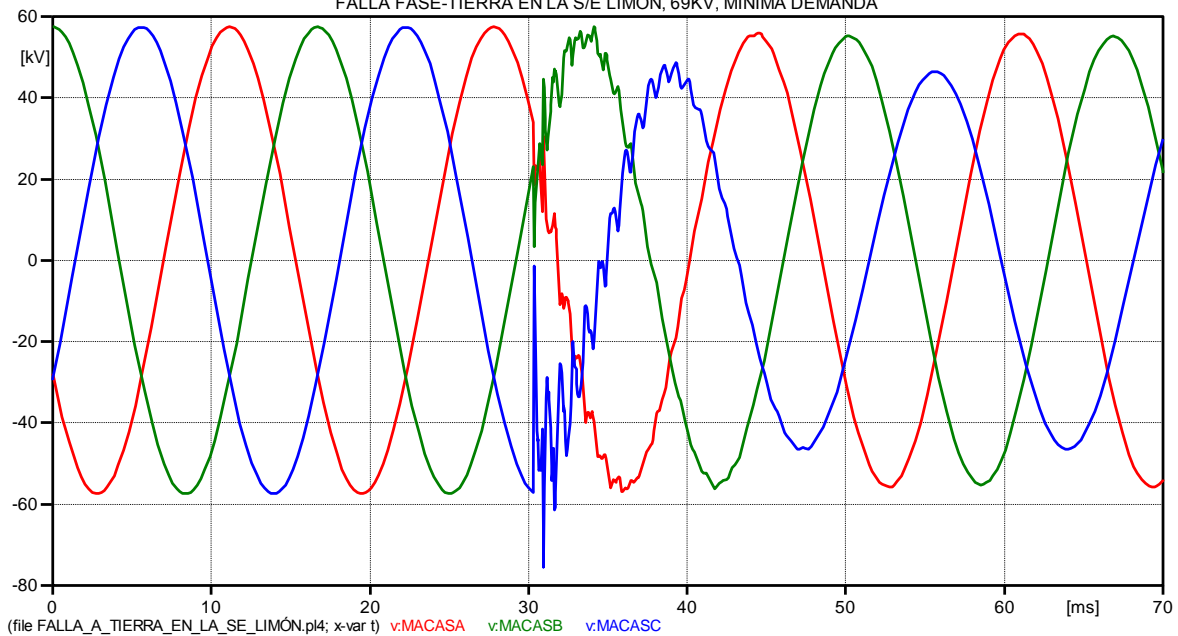


Figura 4. 49 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

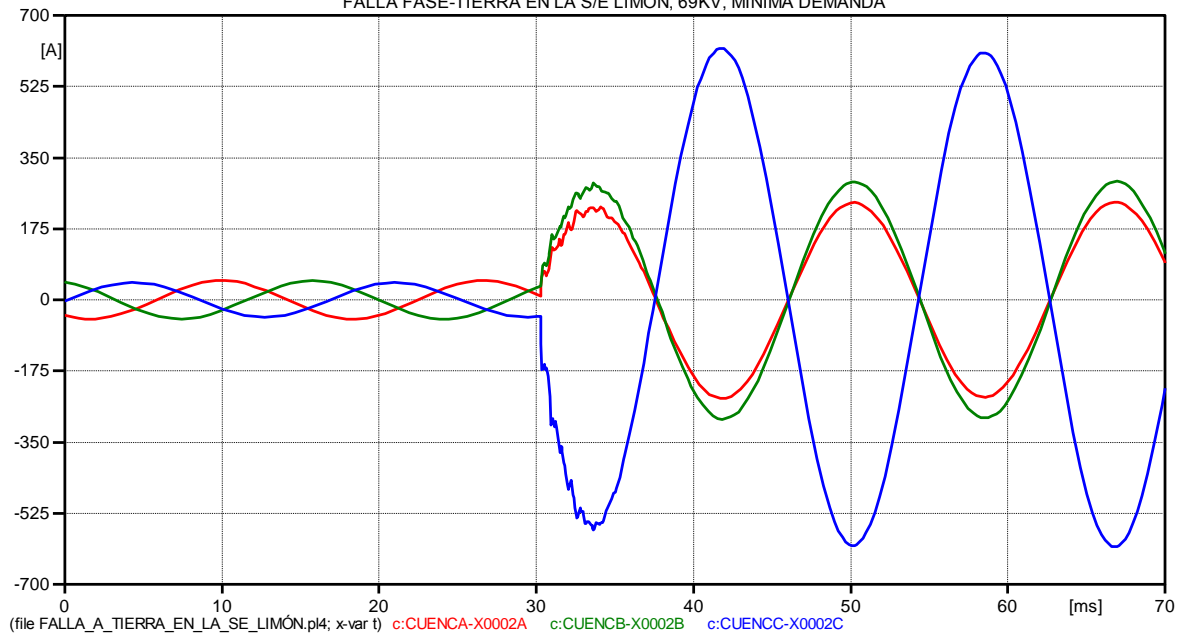


Figura 4. 50 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (69kV)

CORRIENTES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

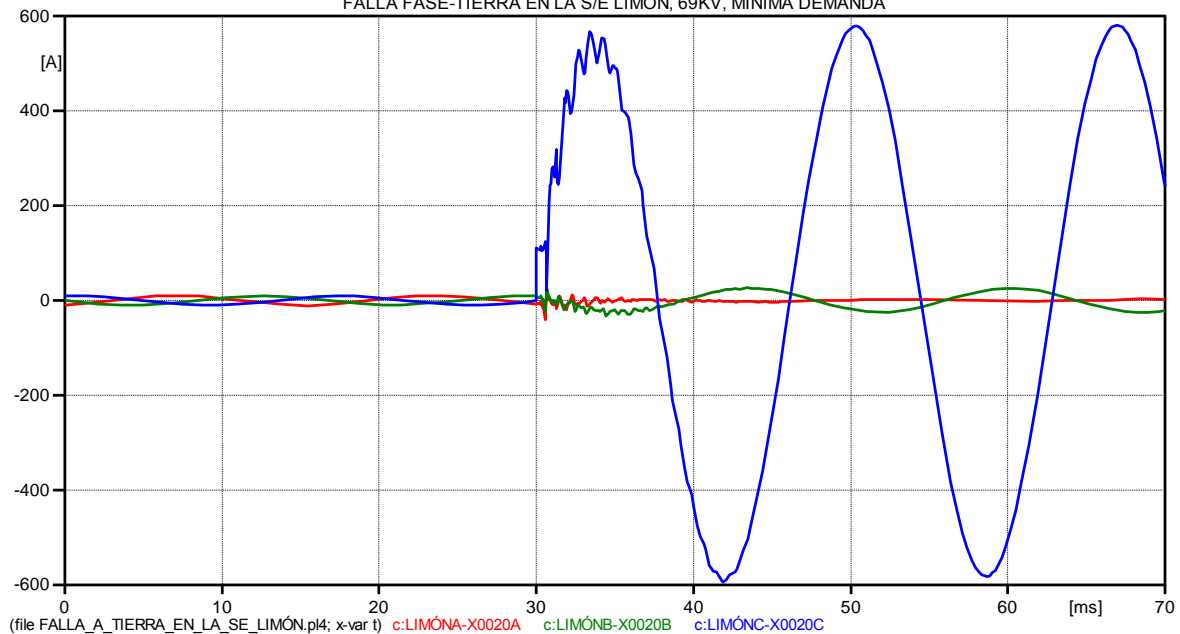


Figura 4. 51 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla a tierra monofásica en la S/E Limón (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

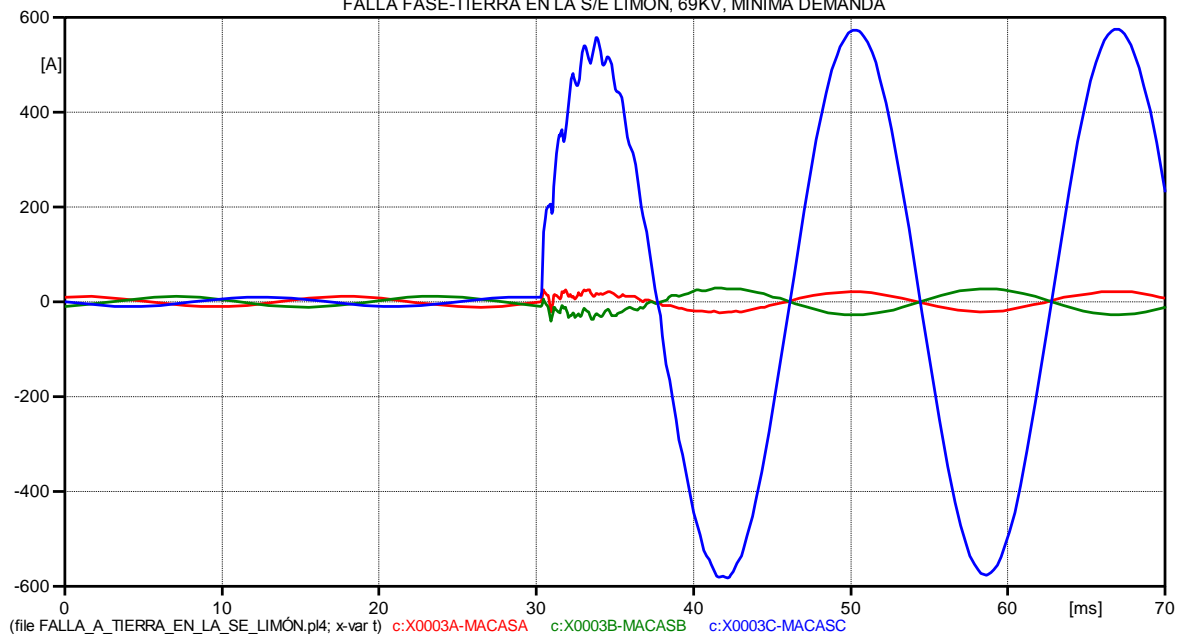


Figura 4. 52 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla a tierra monofásica en la S/E Limón (69kV)

RESUMEN DE RESUSLTADOS

En la Figura 4.49 se observa que la máxima sobretensión se produce en la fase C, de la subestación Macas.

En la Figura 4.47 (S/E Limón) la tensión de la fase C cae a cero por la falla fase-tierra, mientras que en las fases A y B se produce la mayor sobretensión, la misma que disminuye su valor, al alejarse del punto de falla.

De las Figuras 4.50 y 4.51, se observa que la subestación Cuenca Rayoloma aporta con una corriente de falla en la fase C de aproximadamente 600 amperios, mientras que desde la central Hidroabanico se aporta una corriente de falla de la misma magnitud aproximadamente.

También se observa en las Figuras anteriores de corriente, que se originan sobrecorrientes en las fases A y B de las subestaciones, estas sobrecorrientes no son muy altas como las observadas en la fase C.

Los resultados de valores máximos en cada una de las subestaciones, después de la falla se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 31 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 69kV, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN (69kV), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,003	1,022	-1,070	-243,3	-293,6	619,3
GUALACEO	-0,991	1,004	-1,013	-52,9	32,5	877,7
LIMON	-1,232	1,175	0,000	-40,5	-32,3	-593,3
MENDEZ	-1,162	1,130	-1,058	-34,7	-37,6	-591,3
MACAS	-1,011	1,019	-1,339	26,1	-41,2	-581,8

4.2.2.3.2 Falla fase-tierra en la Subestación Limón al nivel de 138kV.

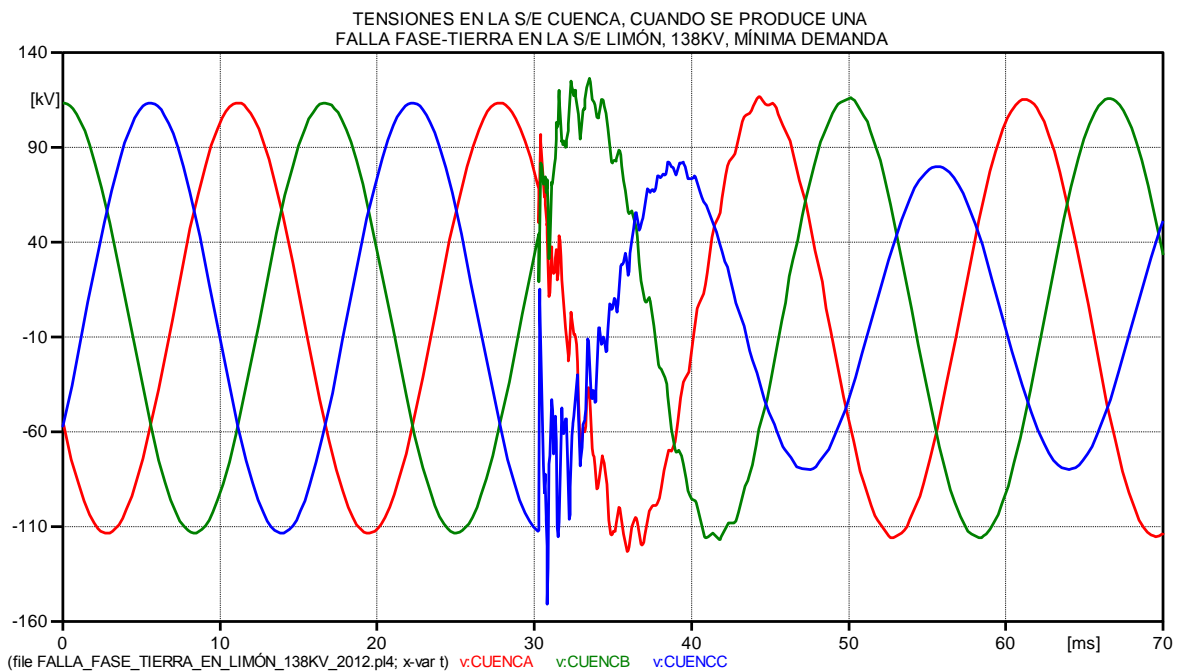


Figura 4. 53 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

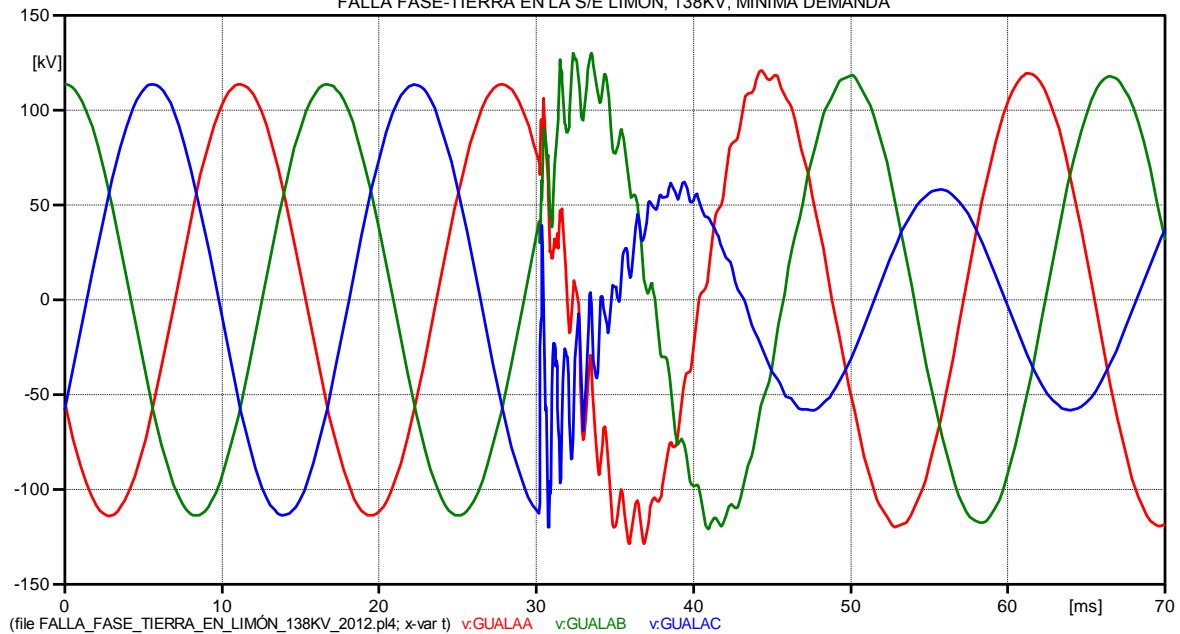


Figura 4. 54 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

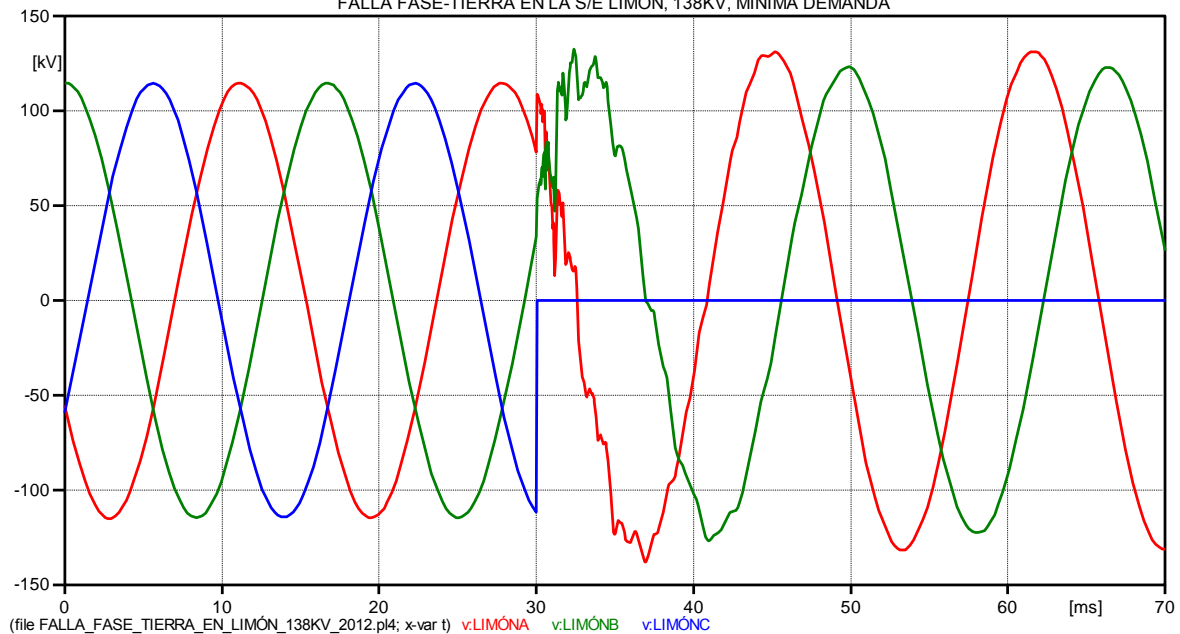


Figura 4. 55 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA
FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

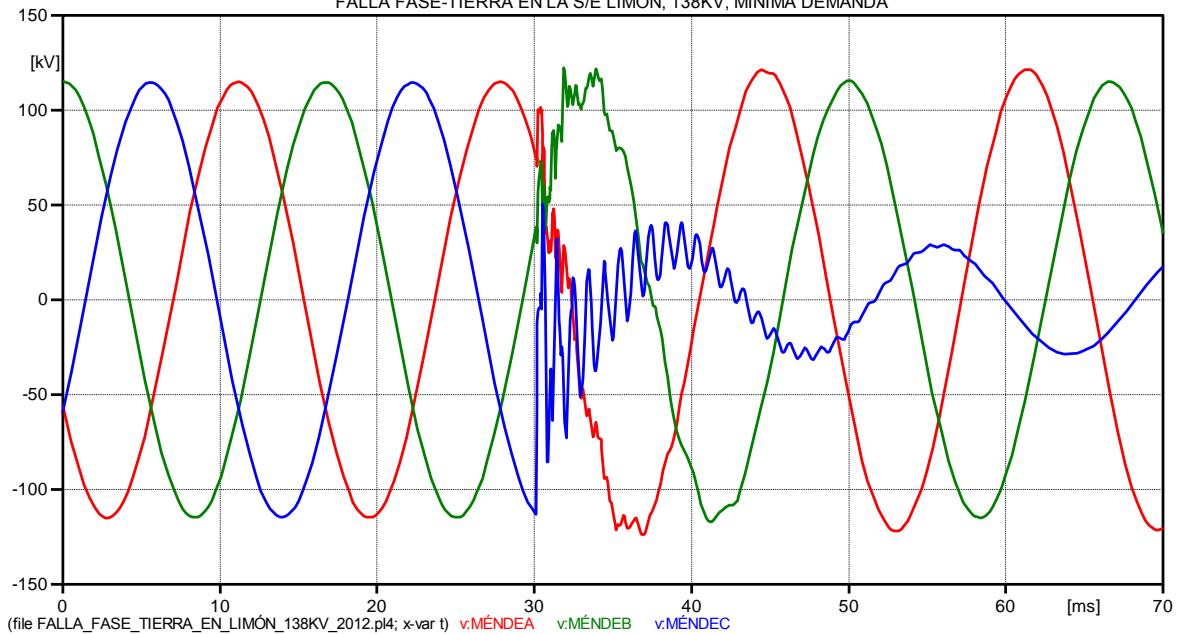


Figura 4. 56 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA
FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

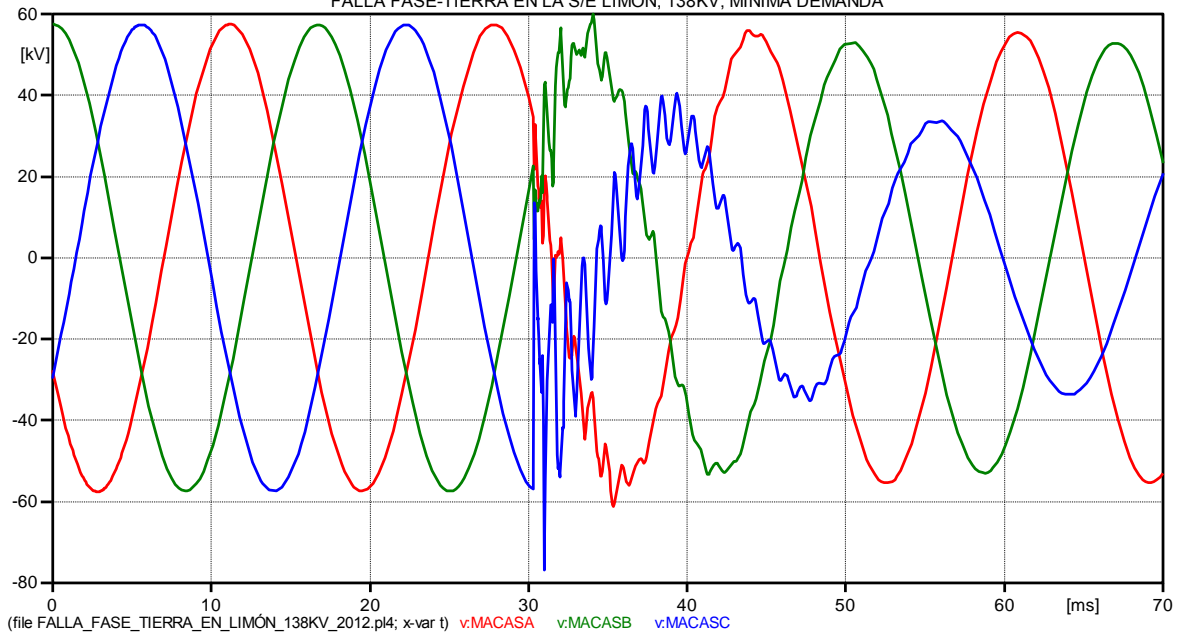


Figura 4. 57 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

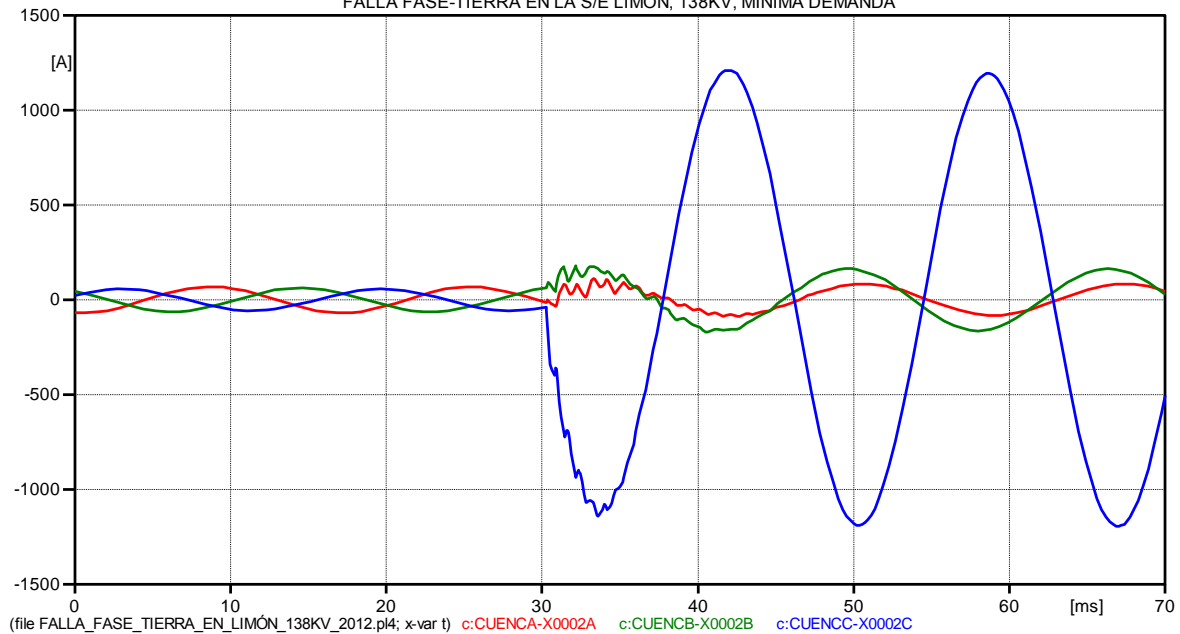


Figura 4. 58 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)

CORRIENTES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

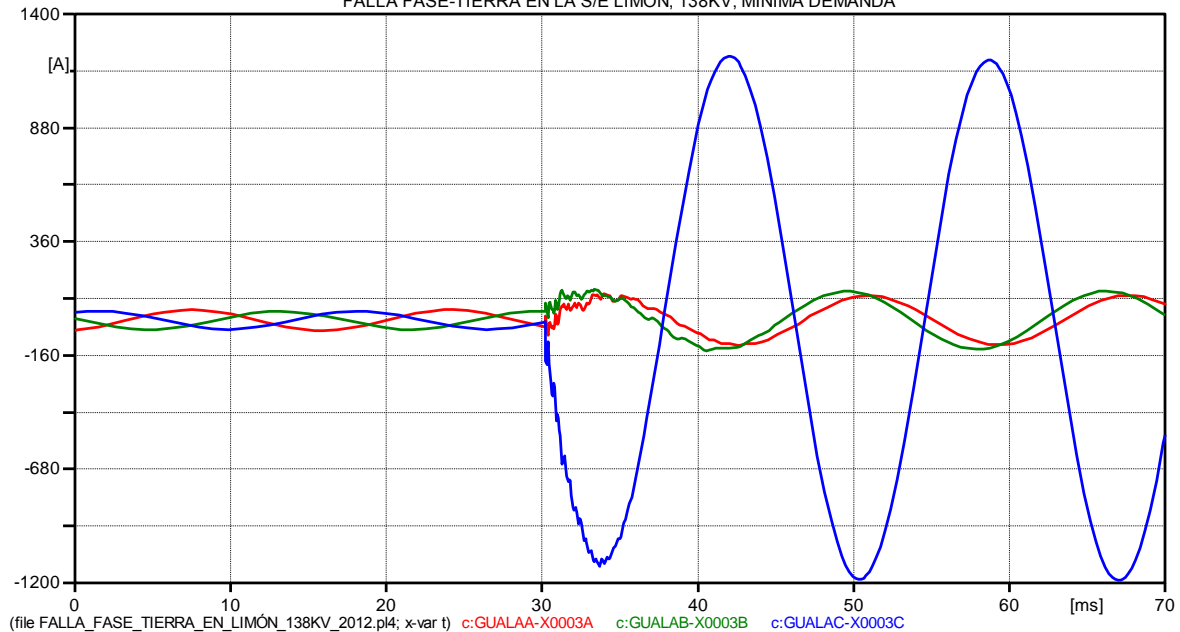


Figura 4. 59 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

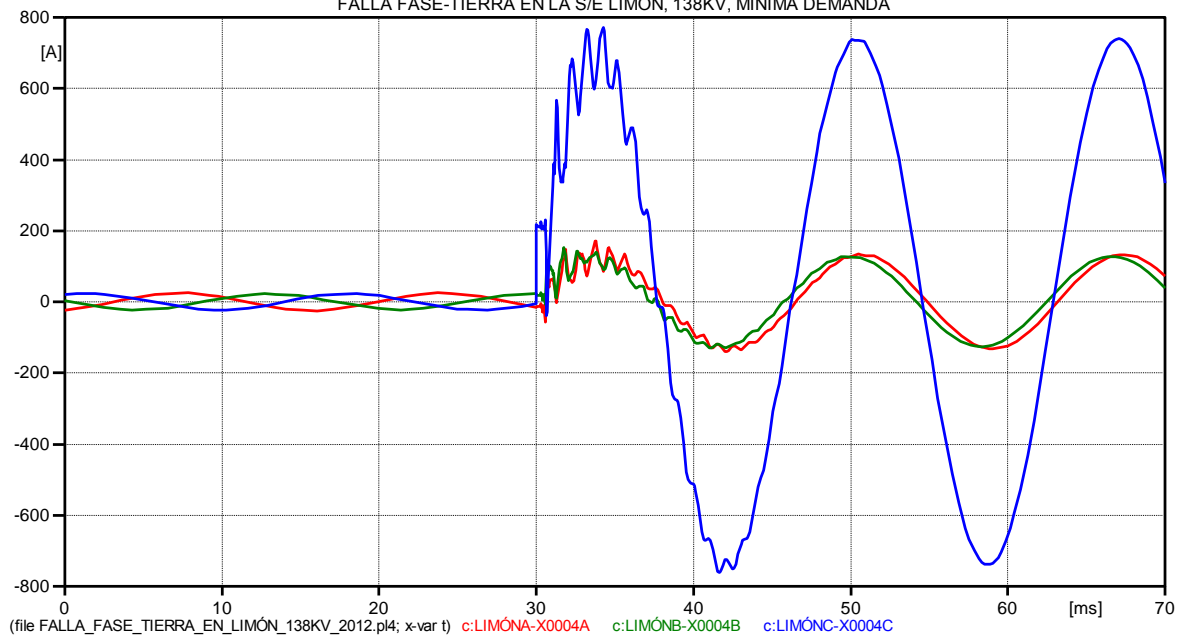


Figura 4. 60 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)

CORRIENTES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

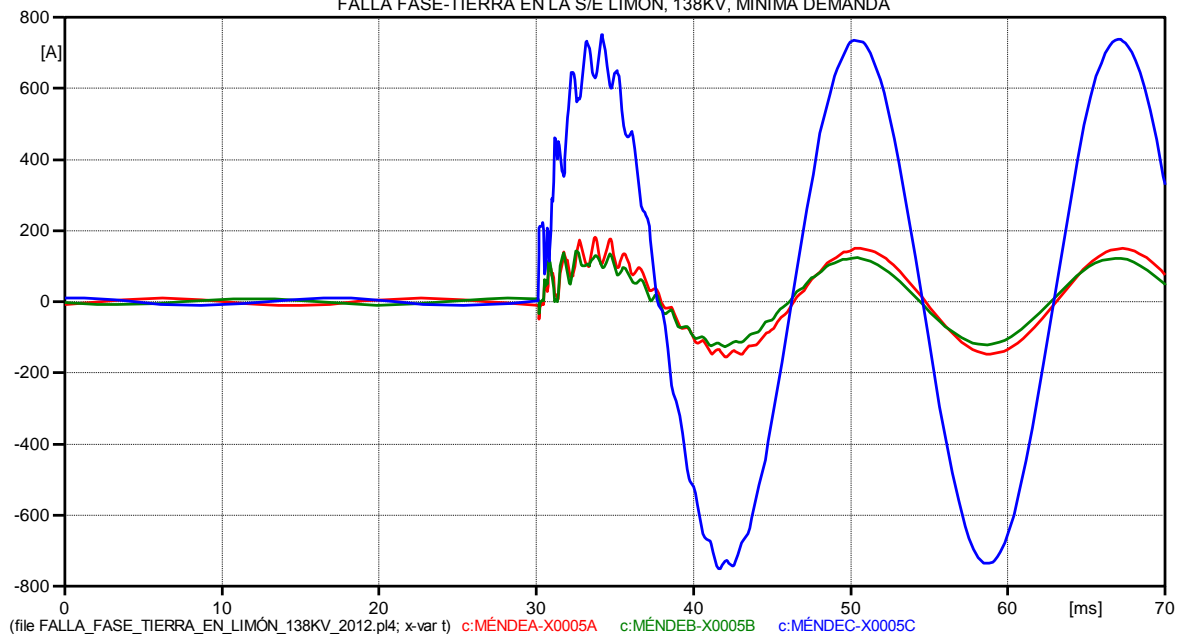


Figura 4. 61 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

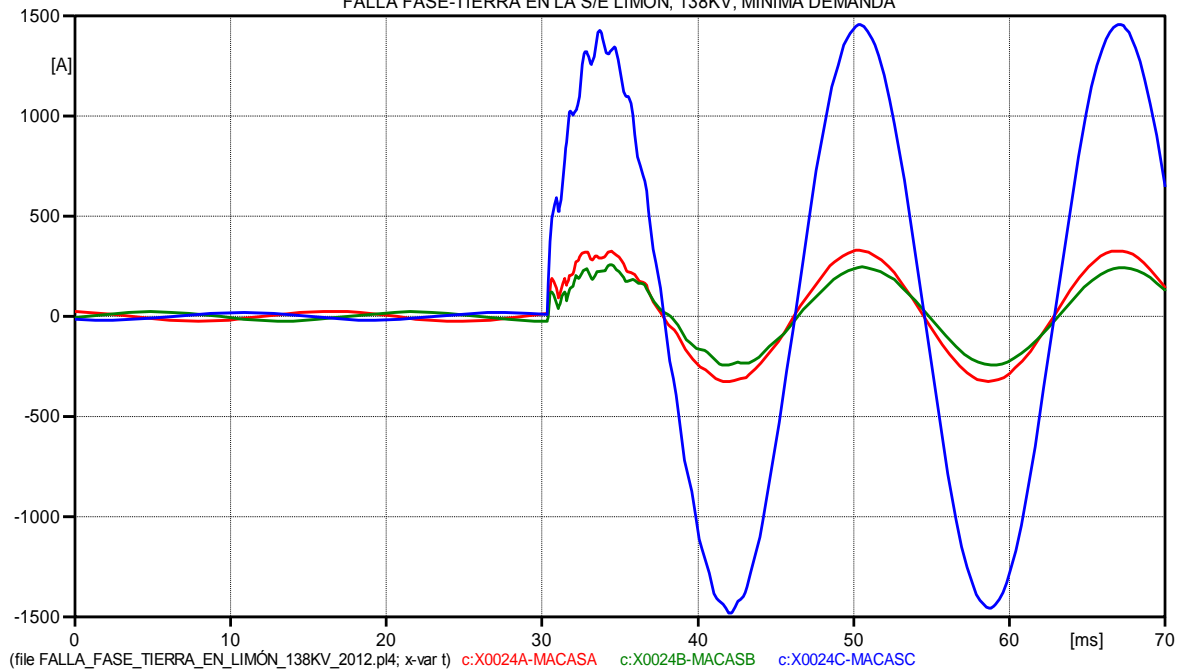


Figura 4. 62 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón (138kV-2012)

RESUMEN DE RESULTADOS

En la Figura 4.55 se observa que se originan las máximas sobretensiones en las fases A y B, mientras que el valor de tensión de la fase C cae a cero a consecuencia de la falla fase-tierra.

En las restantes Figuras de las tensiones, se observa que el valor de tensión de las fases A y B, disminuyen su valor en cada subestación posterior al punto donde se originó la falla, obteniéndose un valor mínimo de tensión de estas fases en la subestación Macas. Lo contrario sucede con el valor de tensión de la fase C, ya que su valor se incrementa en cada subestación posterior al punto de falla.

Con respecto a la corriente se observa en las Figuras desde la 4.58 hasta la 4.62, que la máxima sobrecorriente se origina en la fase C (fase fallada), en cada una de las subestaciones; mientras que en las fases A y B también se producen sobrecorrientes, pero de valores menores que los originados en la fase C.

Además se observa en la subestación Macas el cambio drástico tanto de la corriente como de la tensión, antes y después del transformador de 138/69Kv; sobre todo el valor de corriente en lado de 69Kv de esta subestación, se eleva



UNIVERSIDAD DE CUENCA

considerablemente debido a las características de funcionamiento del transformador.

En el siguiente cuadro se resumen los valores máximos obtenidos en esta simulación, después de la falla:

Cuadro 4. 32 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2012, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN (138kV-2012), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,092	1,124	-1,340	112,6	177,3	1211,7
GUALACEO	-1,142	1,156	-1,066	121,4	141,4	1207,1
LIMÓN	-1,223	1,175	0,000	171,8	152,3	771,9
MÉNDEZ	-1,100	1,084	-0,760	180,3	143,7	-752,2
MACAS (69kV)	-1,086	1,063	-1,363	330,2	259,9	-1483,0

Cuadro 4. 33 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2012, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN (138kV-2012), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,086	1,114	-1,325	94,8	204,5	1217,5
GUALACEO	-1,136	1,145	-1,054	116,5	146,4	1200,8
LIMÓN	-1,217	1,156	0,000	168,1	153,1	768,8
MÉNDEZ	-1,102	1,069	-0,761	181,4	143,4	753,2
MACAS (69kV)	-1,072	1,056	-1,367	328,1	258,4	-1471,8

De la misma manera se resumen a continuación los valores de sobretensiones y sobrecorrientes, para las demandas de los años 2015 y 2020, obtenidos en la simulación, después de la falla:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 34 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2015, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN (138kV-2015), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,069	1,114	-1,303	119,3	193,1	1285,9
GUALACEO	-1,131	1,169	-1,063	131,5	155,9	1277,8
LIMÓN	-1,257	1,159	0,000	175,1	153,3	775,5
MÉNDEZ	-1,129	1,087	-0,756	190,3	148,0	757,1
MACAS (69kV)	-1,042	1,072	-1,385	-347,7	266,8	-1481,3

Cuadro 4. 35 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2015, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN (138kV-2015), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,060	1,104	-1,285	104,30	229,30	1290,40
GUALACEO	-1,122	1,157	-1,047	127,70	164,30	1270,00
LIMÓN	-1,248	1,142	0,000	169,60	162,00	769,5
MÉNDEZ	-1,123	1,072	-0,758	189,90	153,40	757,50
MACAS (69kV)	-1,021	1,057	-1,387	344,7	271,2	-1464,6

Cuadro 4. 36 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2020, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN (138kV-2020), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,044	1,081	-1,241	116,8	213,2	1373,6
GUALACEO	-1,126	1,153	-1,057	139,8	167,7	1362,9
LIMÓN	-1,261	1,179	0,000	167,7	157,1	772,5
MÉNDEZ	-1,154	1,087	-0,748	190,6	156,2	757,1
MACAS (69kV)	-0,998	1,045	-1,390	-359,6	-274,1	-1471,7



Cuadro 4. 37 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Limón, al nivel de 138kV-2020, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E LIMÓN (138kV-2020), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,044	1,071	-1,224	-128,8	257,9	1381,7
GUALACEO	-1,125	1,136	-1,037	134,6	178,8	1353,5
LIMÓN	-1,242	1,177	0,000	159,2	167,9	767,2
MÉNDEZ	-1,145	1,063	-0,750	190,3	162,0	754,2
MACAS (69kV)	-0,994	1,020	-1,392	-354,8	-280,1	-1447,7

4.2.2.4 Falla fase-tierra en la subestación Méndez

4.2.2.4.1 Falla fase-tierra en la Subestación Méndez a nivel de 69kV.

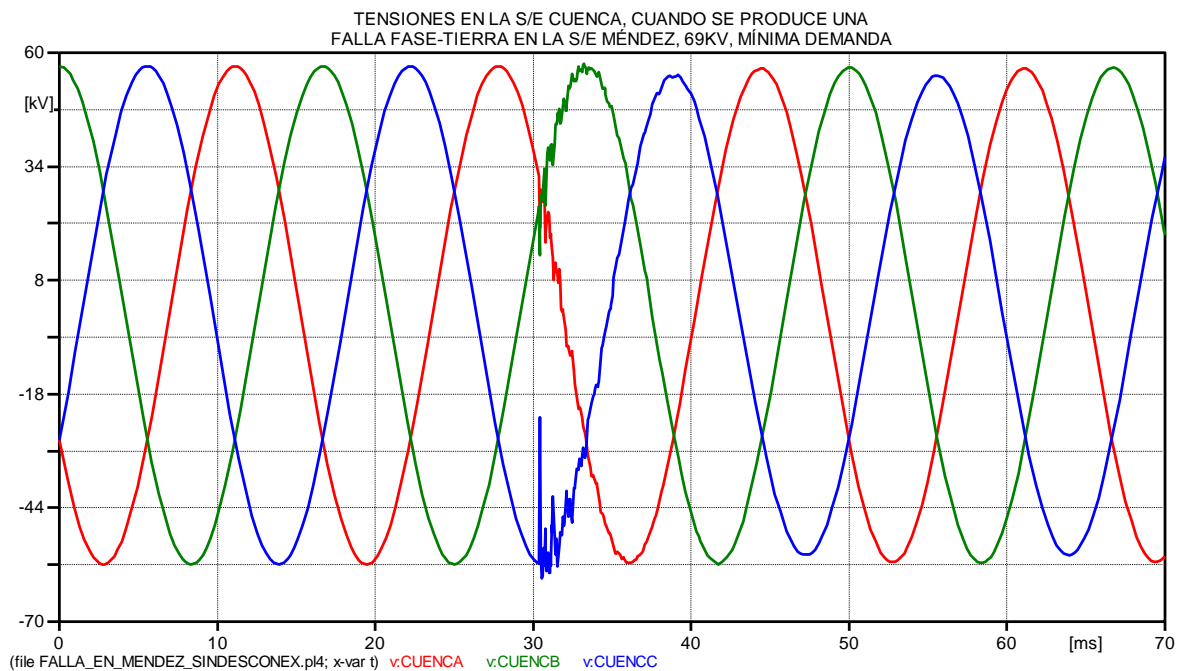


Figura 4. 63 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

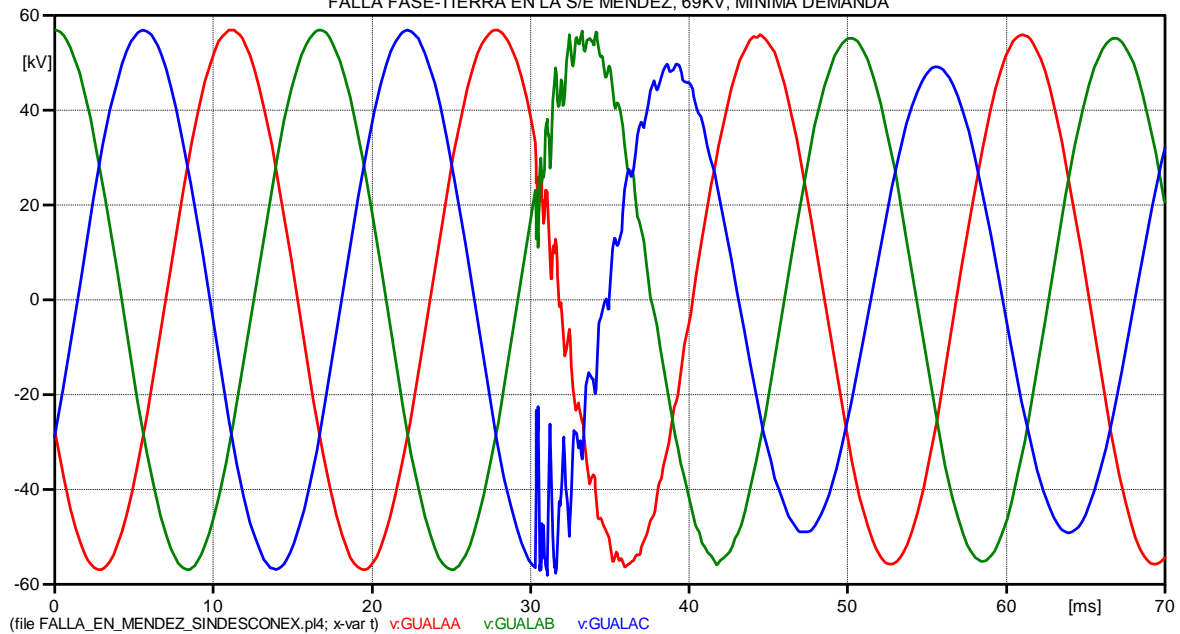


Figura 4. 64 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

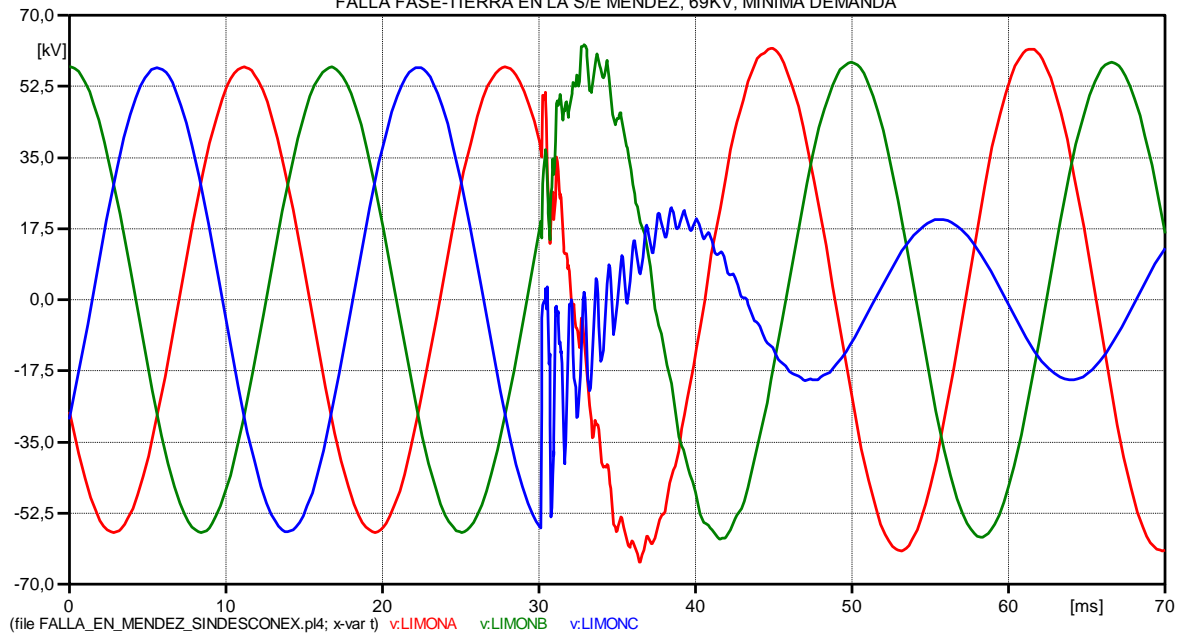


Figura 4. 65 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

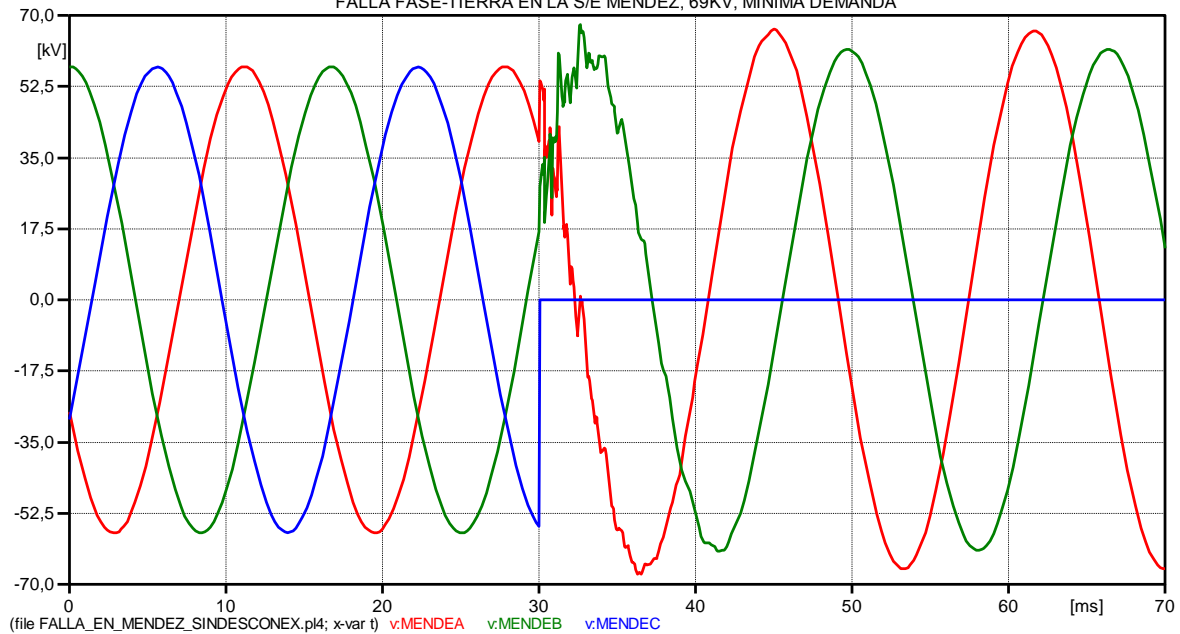


Figura 4. 66 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

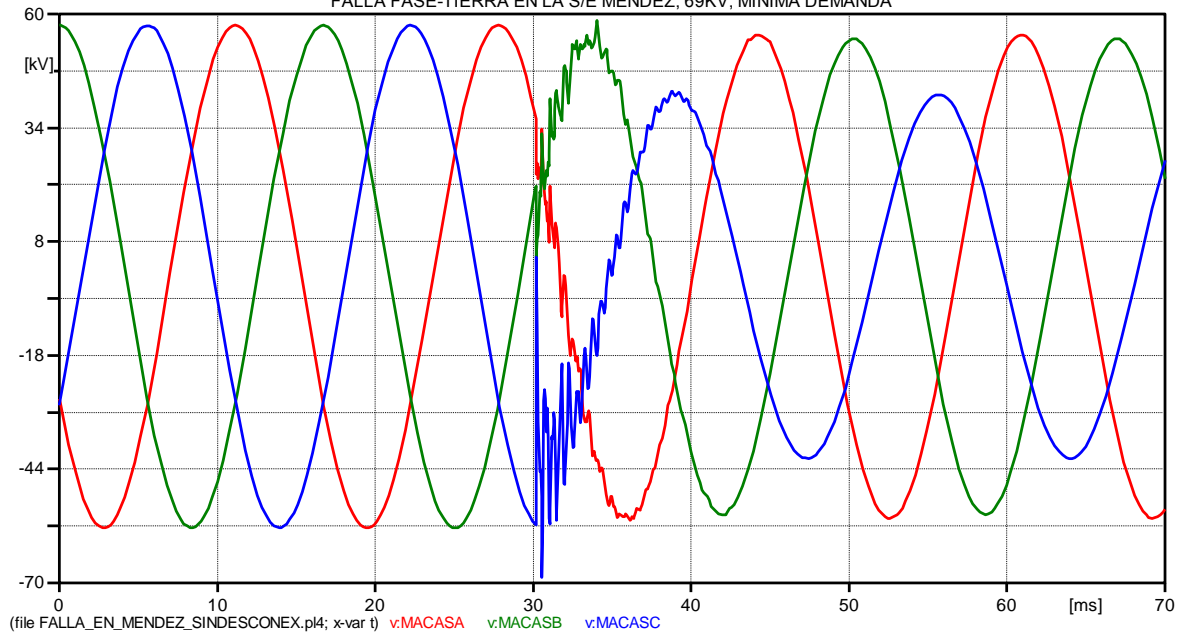


Figura 4. 67 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA
CORRIENTES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA
FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

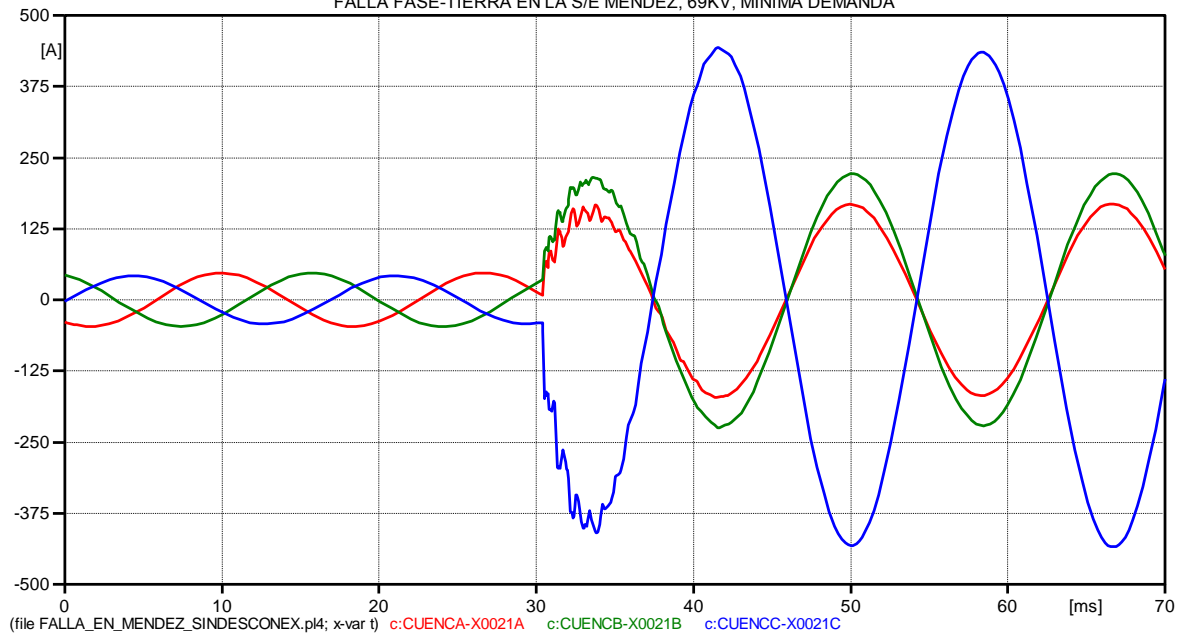


Figura 4. 68 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)

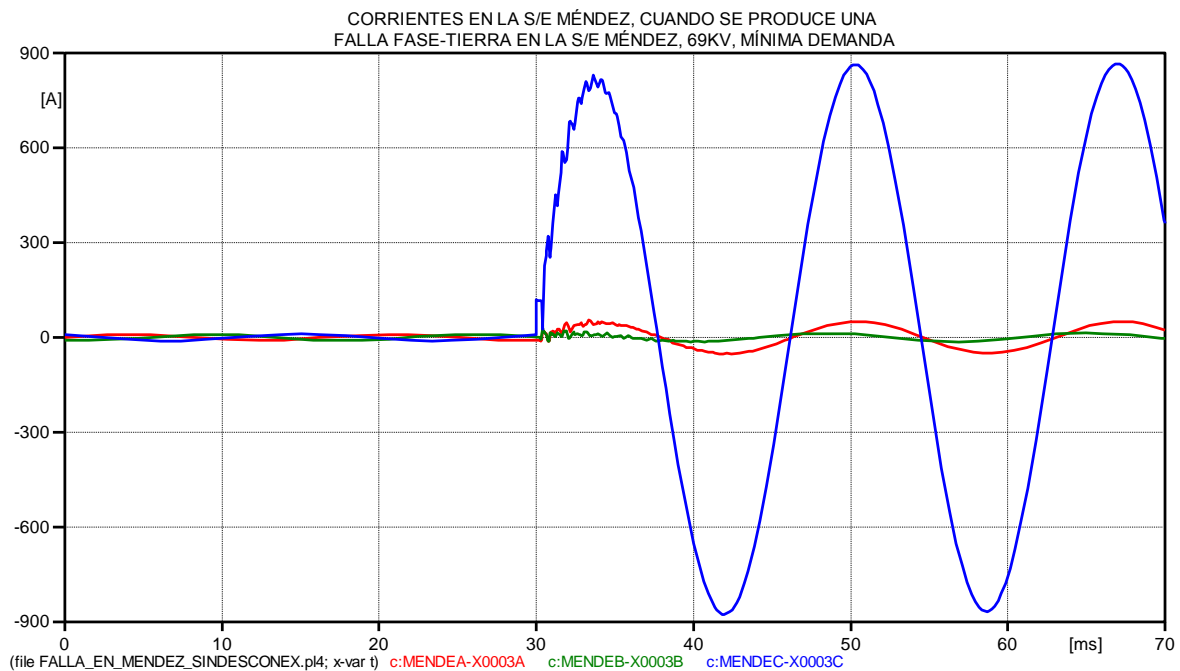


Figura 4. 69 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA
CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA
FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

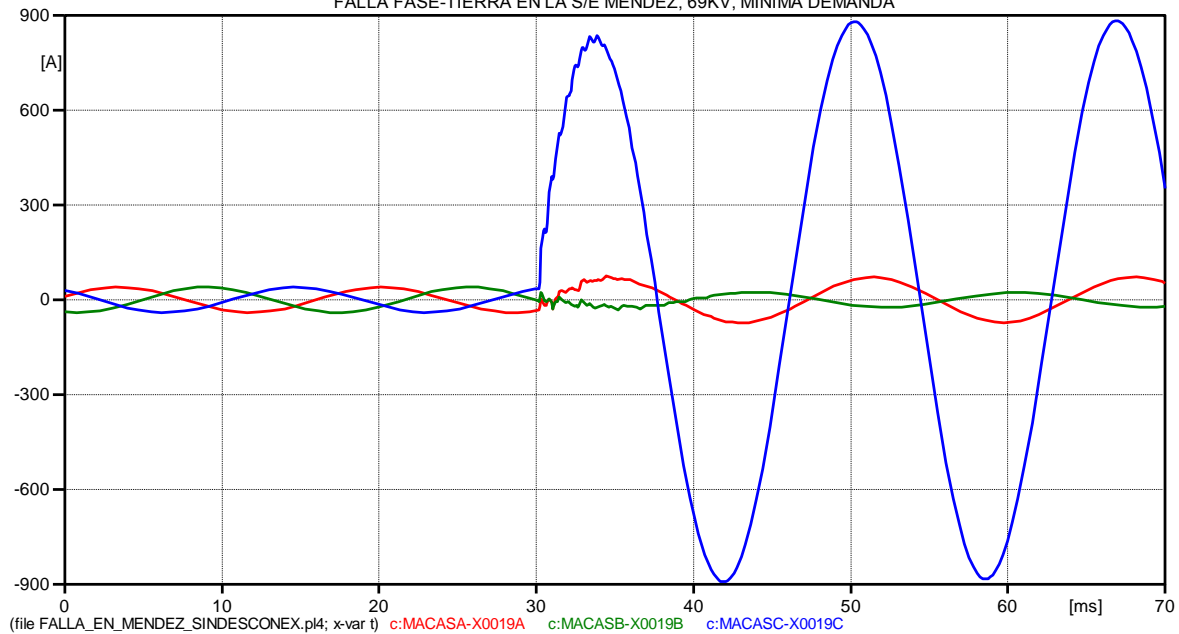


Figura 4. 70 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (69kV)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 4.66 se observa que la tensión de la fase C cae a cero debido a la falla fase-tierra, mientras que en las fases A y B se producen las sobretensiones más altas, las mismas que al alejarse del punto de falla van disminuyendo su valor.

La mayor sobretensión se produce en la subestación Macas, específicamente en la fase C, esto se observa en la Figura 4.67

También la mayor sobrecorriente se produce en la fase C, en cada una de las subestaciones, observándose que la máxima sobrecorriente de esta fase se da en la subestación Méndez; de esta manera la central Hidroabánico aporta la mayor corriente de falla, en comparación con la corriente que se aporta desde la subestación Cuenca Rayoloma.

De igual forma se observa que se producen sobrecorrientes en las fases A y B de valores no muy altos, comparados con las sobrecorrientes de la fase C (fase fallada).



Los resultados de valores máximos después de la falla, en cada una de las subestaciones se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 38 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 69kV, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,005	1,020	-1,068	-171,4	-224,7	444,2
GUALACEO	-1,000	1,005	-1,032	-48,3	45,2	589,3
LIMON	-1,147	1,114	-0,949	48,3	33,6	597,0
MENDEZ	-1,198	1,201	0,000	56,0	28,0	-876,8
MACAS	-0,988	1,039	-1,220	63,7	-26,2	-871,1

4.2.2.4.2 Falla fase-tierra en la Subestación Méndez al nivel de 138kV.

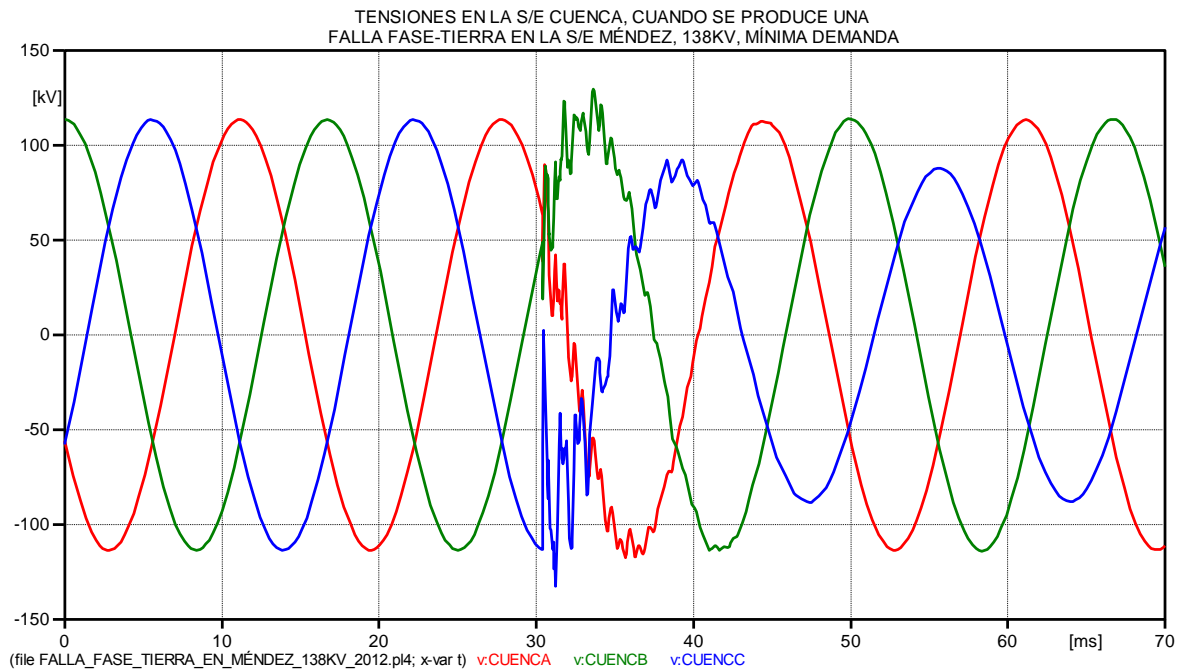


Figura 4. 71 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, 138kV-2012



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

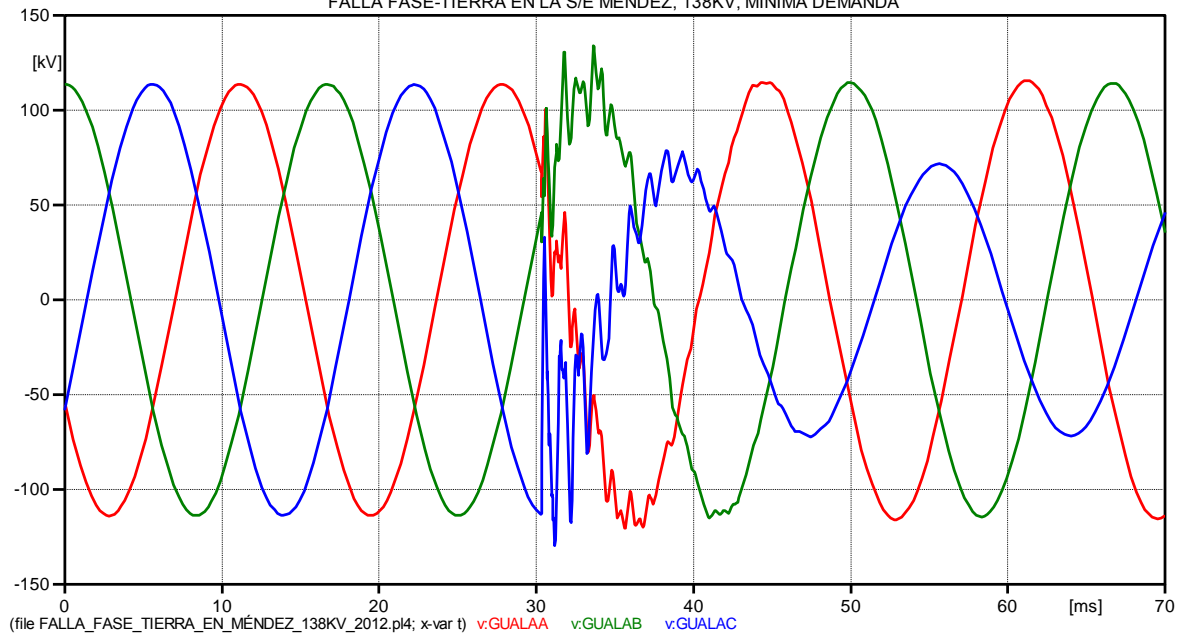


Figura 4. 72 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

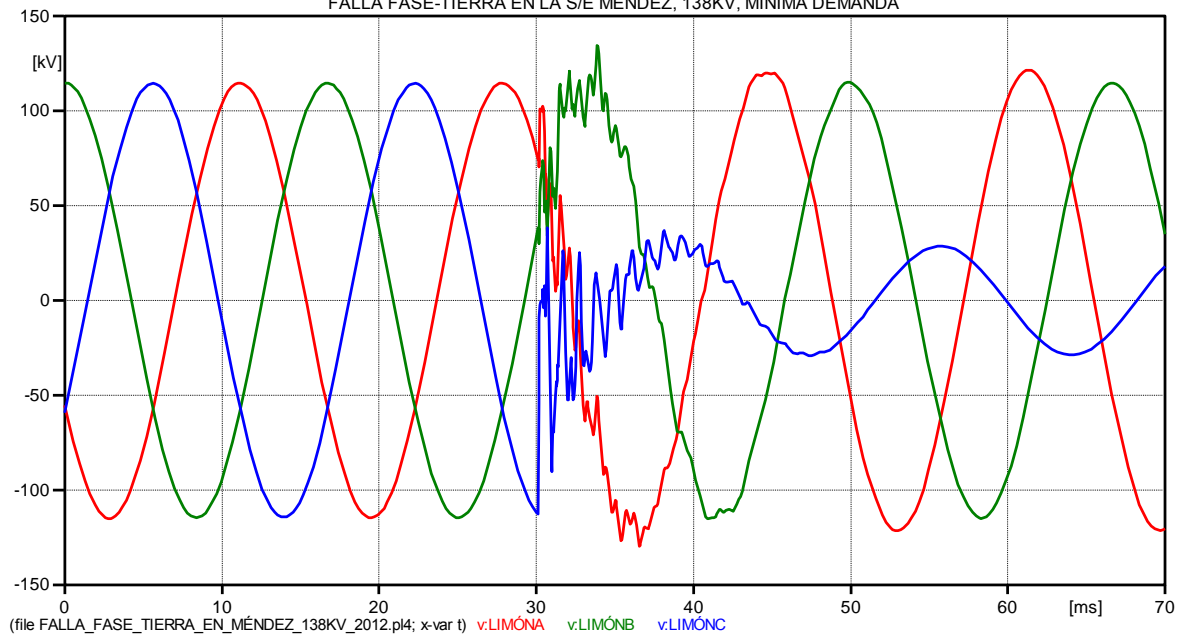


Figura 4. 73 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

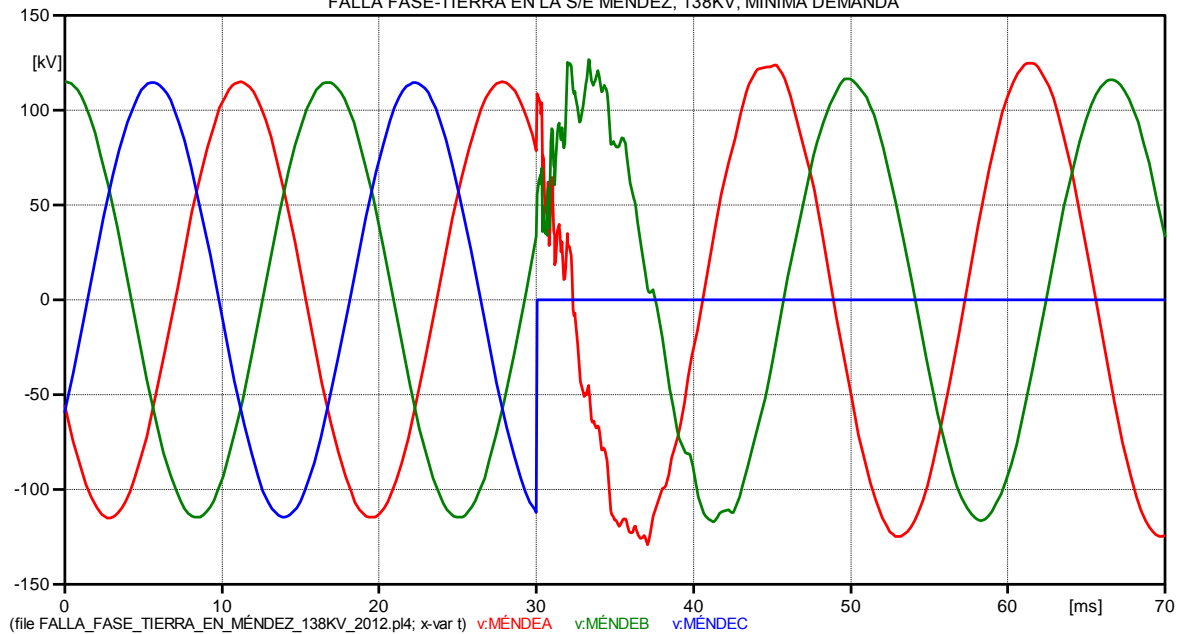


Figura 4. 74 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

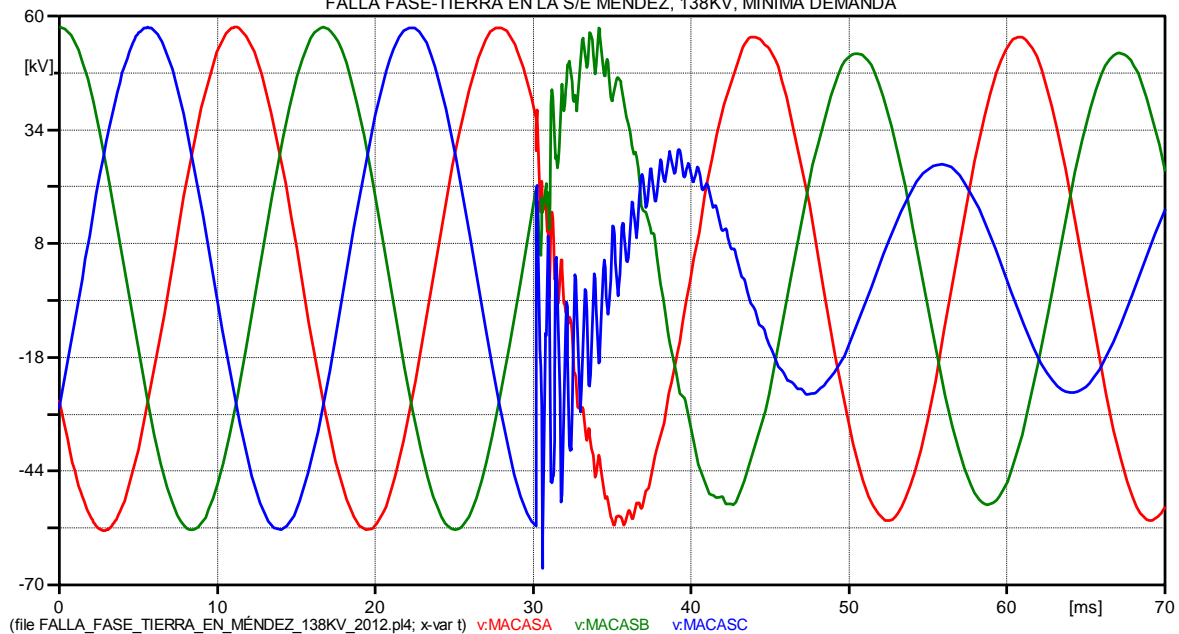


Figura 4. 75 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

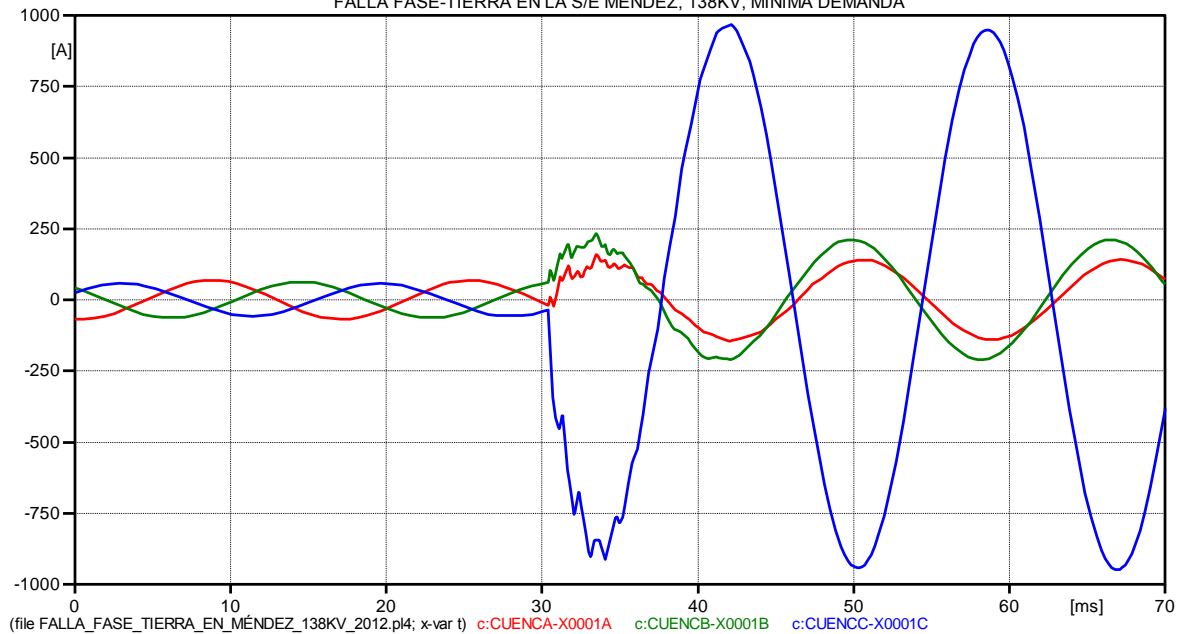


Figura 4. 76 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)

CORRIENTES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

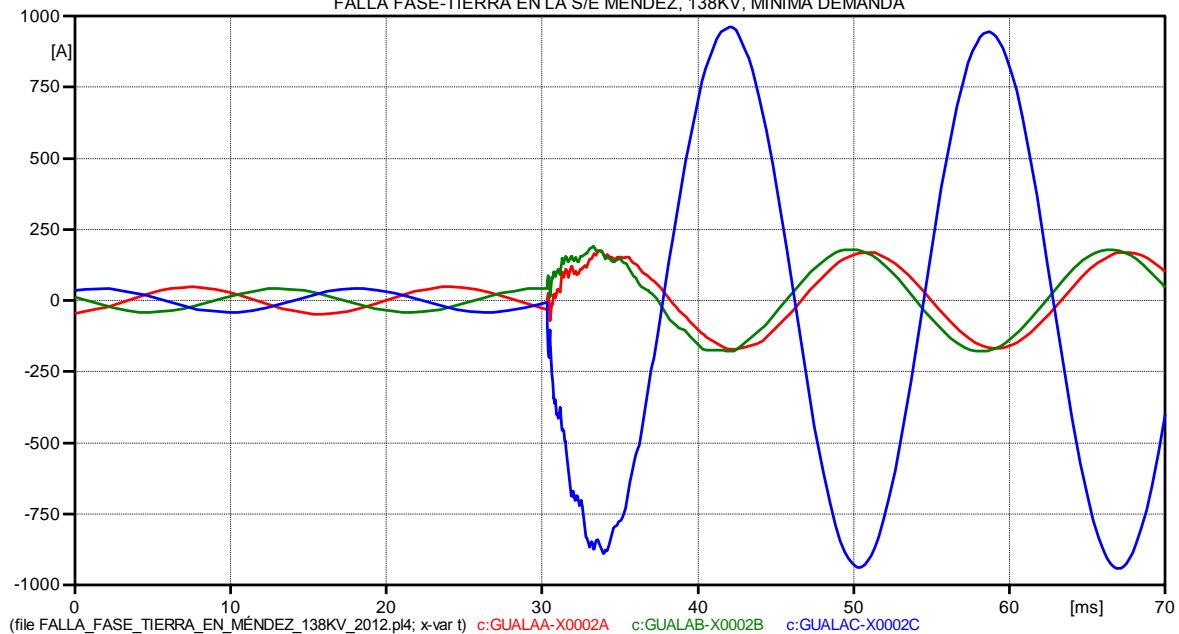


Figura 4. 77 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

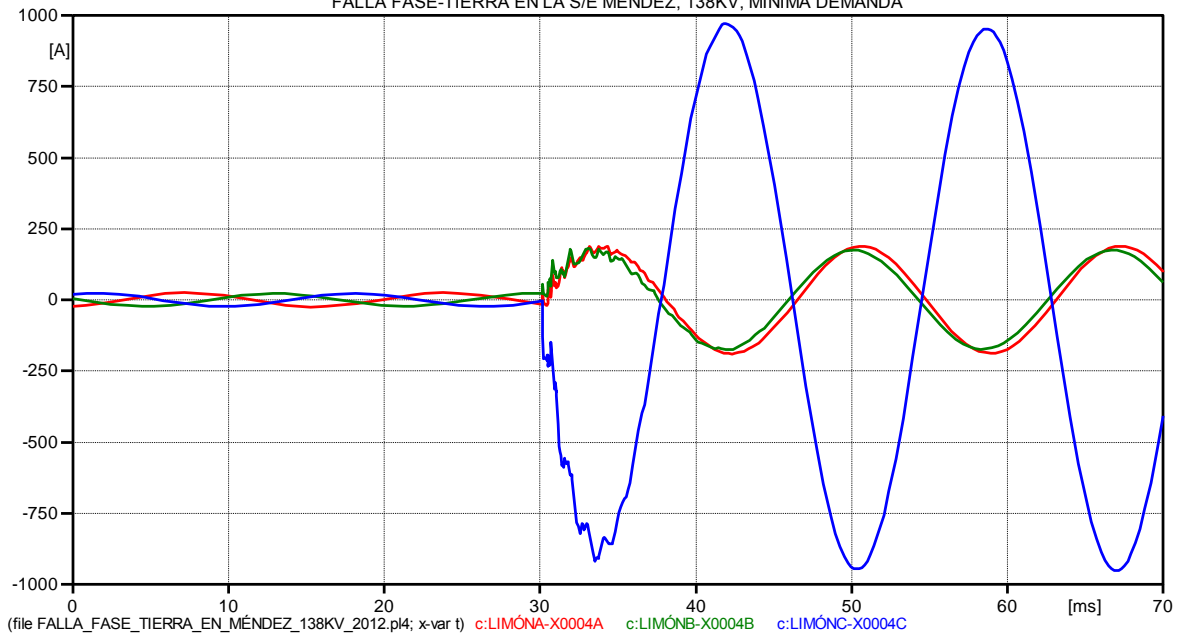


Figura 4. 78 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)

CORRIENTES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

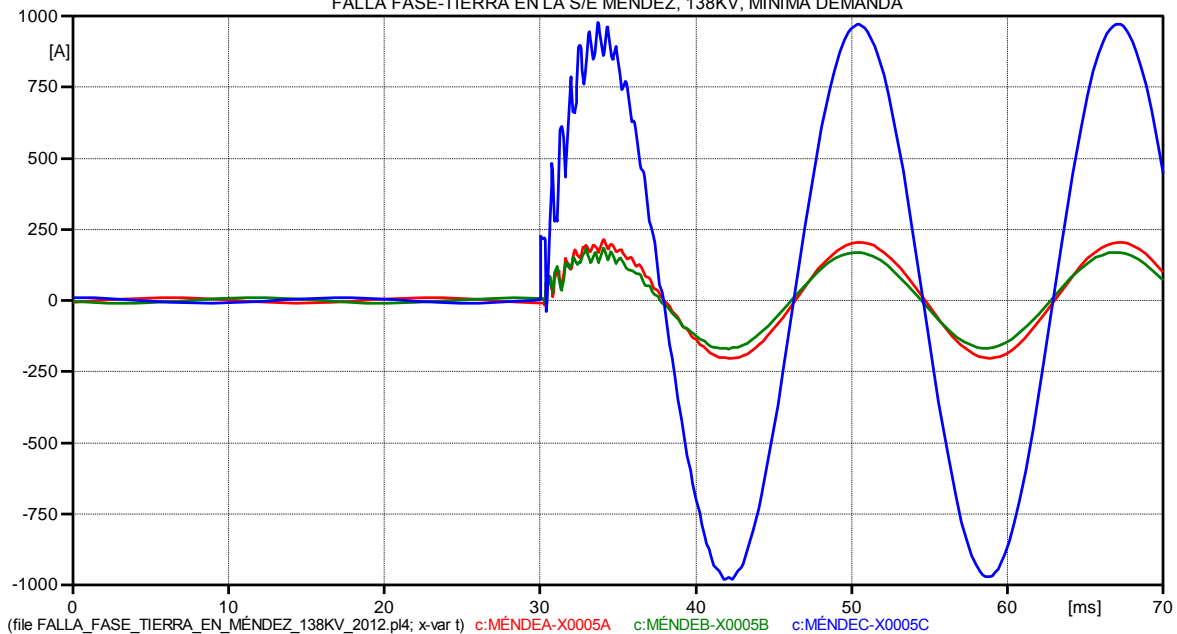


Figura 4. 79 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

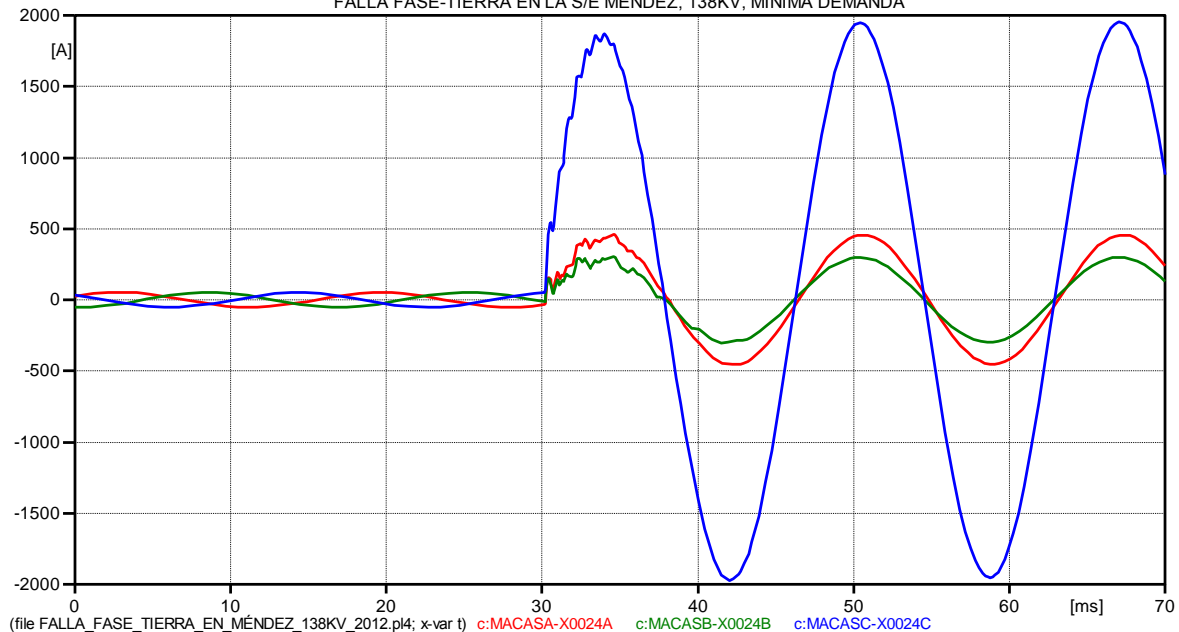


Figura 4. 80 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez (138kV-2012)

RESUMEN DE RESULTADOS

En la Figura 4.74 se observa que se originan sobretensiones en las fases A y B, en la subestación donde se produce la falla (S/E Méndez); mientras que el valor de la tensión de la fase C cae a cero a consecuencia de la falla fase-tierra.

En las restantes Figuras de las tensiones, se observa que el valor de sobretensión de las fases A y B de la subestación Méndez, crecen hasta la subestación Limón y disminuye su valor en las subestaciones Gualaceo y Cuenca Rayoloma.

La tensión de la fase C de la subestación Méndez, crece en ambos sentidos de la línea; de esta manera se obtienen sobretensiones en esta fase, tanto en la subestación Cuenca como en la subestación Macas.

Con respecto a la corriente se observa en las Figuras desde la 4.76 hasta la 4.80, que la máxima sobrecorriente se origina en la fase C, en cada una de las subestaciones; mientras que en las fases A y B también se producen sobrecorrientes, pero de valores menores que los de la fase C.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

La central Hidroabánico aporta con la mayor corriente de falla, en comparación con la corriente proveniente desde la subestación Cuenca Rayoloma, ya que la distancia de esta central con respecto a la falla es muy pequeña.

Al igual que en las simulaciones anteriores al nivel de 138kV, se observa el cambio sustancial; tanto de la corriente como de la tensión, antes y después del transformador de 138/69 kV de la subestación Macas.

Los resultados de valores máximos en cada una de las subestaciones, después de la falla se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 39 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2012, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ (138kV-2012), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,043	1,148	-1,176	158,9	232,7	968,1
GUALACEO	-1,070	1,188	-1,152	175,9	190,9	962,1
LIMÓN	-1,149	1,191	-0,802	-190,3	180,3	972,2
MÉNDEZ	-1,145	1,123	0,000	214,6	186,0	-981,2
MACAS (69kV)	-1,001	1,017	-1,176	439,0	347,9	-1950,9

Cuadro 4. 40 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2012, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ (138kV-2012), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,042	1,147	-1,161	140,9	262,6	974,8
GUALACEO	-1,061	1,181	-1,132	169,3	194,8	956,9
LIMÓN	-1,147	1,169	-0,804	185,5	184,0	963,7
MÉNDEZ	-1,147	1,115	0,000	214,4	187,1	979,9
MACAS (69kV)	-0,992	1,009	-1,172	435,9	345,8	-1936,4

Del mismo modo a continuación se resumen los resultados obtenidos, utilizando las demandas de los años 2015 y 2020 respectivamente:



Cuadro 4. 41 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2015, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ (138kV-2015), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,061	1,153	-1,134	166,5	246,2	1018,0
GUALACEO	-1,095	1,203	-1,130	179,1	197,4	1007,8
LIMÓN	-1,160	1,168	-0,829	200,1	192,9	1010,5
MÉNDEZ	-1,155	1,138	0,000	220,5	192,2	-984,1
MACAS (69kV)	-0,998	1,002	-1,174	456,7	360,8	-1951,5

Cuadro 4. 42 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2015, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ (138kV-2015), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,062	1,147	-1,118	145,3	282,0	1025,4
GUALACEO	-1,096	1,191	-1,109	171,7	202,7	1000,8
LIMÓN	1,154	1,145	-0,824	197,7	200,6	1004,7
MÉNDEZ	-1,151	1,124	0,000	218,1	194,1	981,6
MACAS (69kV)	-0,991	0,994	-1,168	452,93	364,3	-1933,2

Cuadro 4. 43 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2020, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ (138kV-2020), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,057	1,121	-1,093	165,4	263,4	1062,8
GUALACEO	-1,107	1,197	-1,090	182,7	-205,5	1048,8
LIMÓN	-1,140	1,119	-0,855	208,5	206,7	1062,2
MÉNDEZ	-1,177	1,136	0,000	-220,7	192,4	-984,6
MACAS (69kV)	-0,988	0,987	-1,170	-473,1	383,4	-1944,6

Cuadro 4. 44 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2020, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MÉNDEZ (138kV-2020), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,054	1,114	-1,084	139,1	309,6	1073,3
GUALACEO	-1,102	1,182	-1,067	174,8	214,7	1041,1
LIMÓN	-1,128	1,095	-0,845	203,7	217,3	1053,0
MÉNDEZ	-1,165	1,112	0,000	218,2	194,9	981,2
MACAS (69kV)	-0,980	0,972	-1,162	-465,4	388,0	-1918,5

4.2.2.5 Falla fase-tierra en la subestación Macas

4.2.2.5.1 Falla fase-tierra en la Subestación Macas a nivel de 69kV.

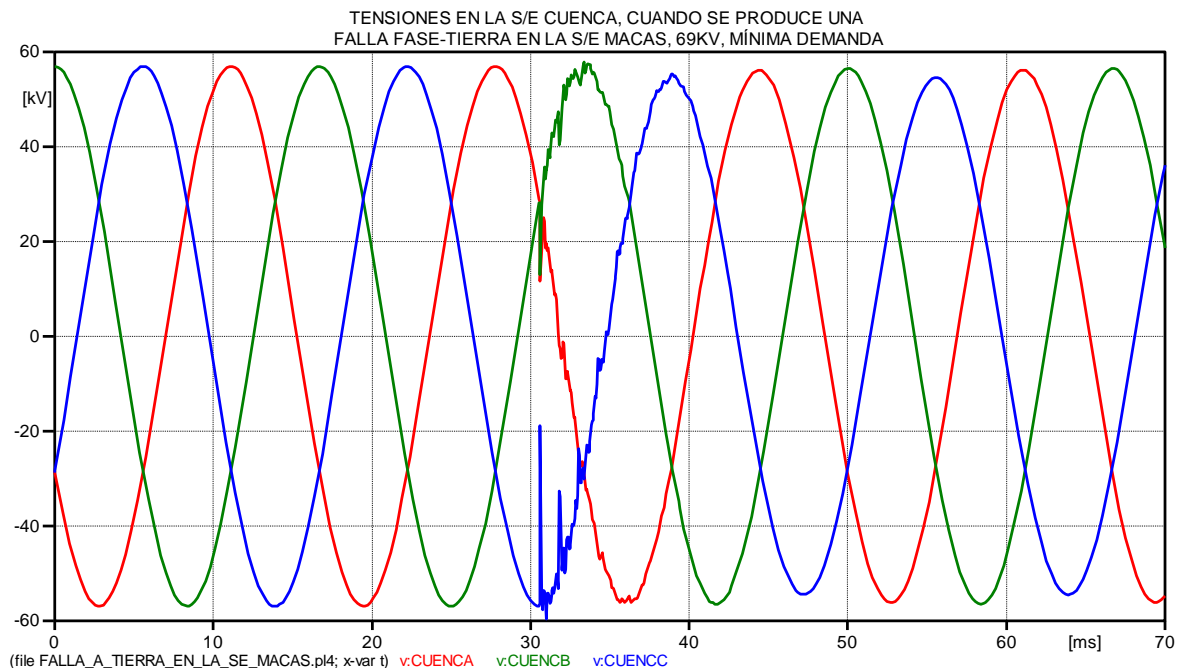


Figura 4. 81 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

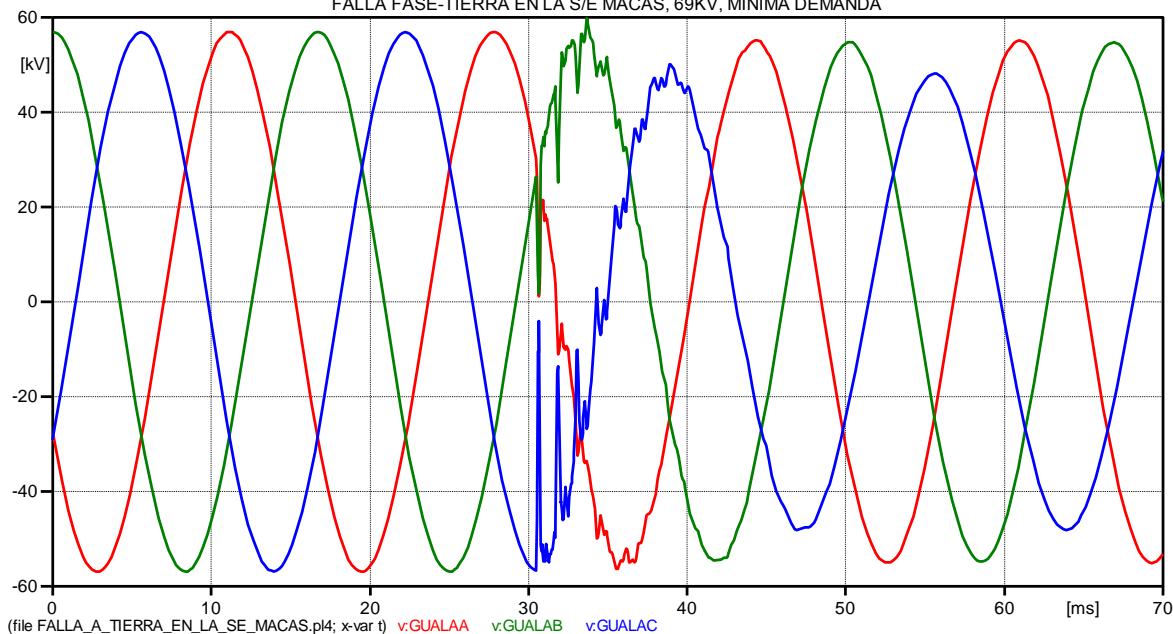


Figura 4. 82 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS, 69KV, MÍNIMA DEMANDA

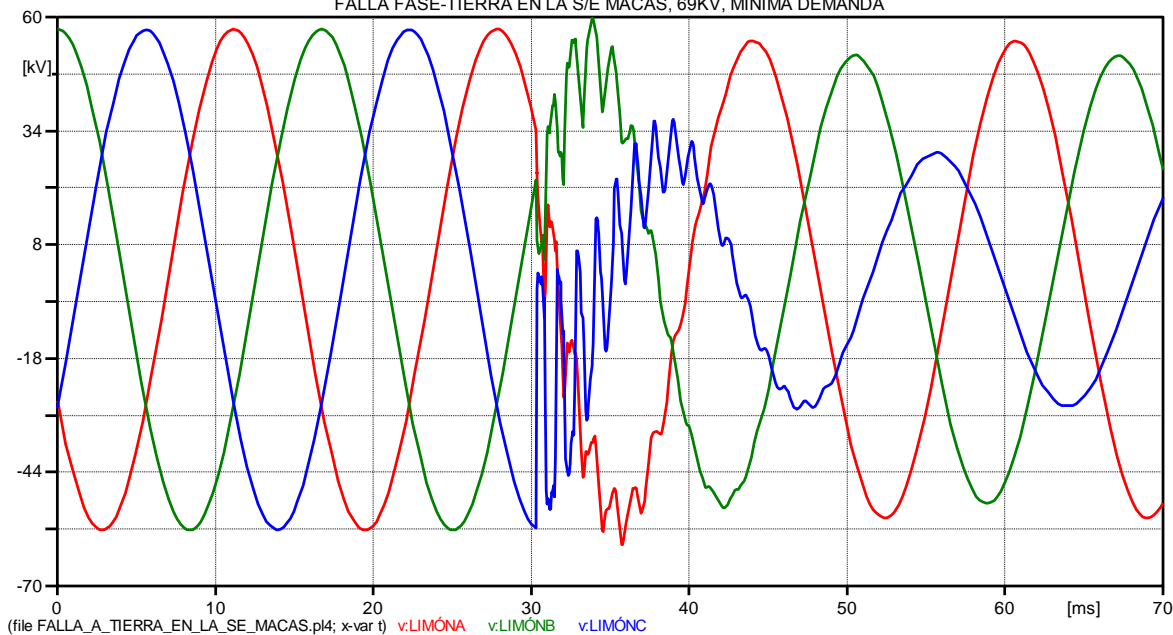


Figura 4. 83 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)

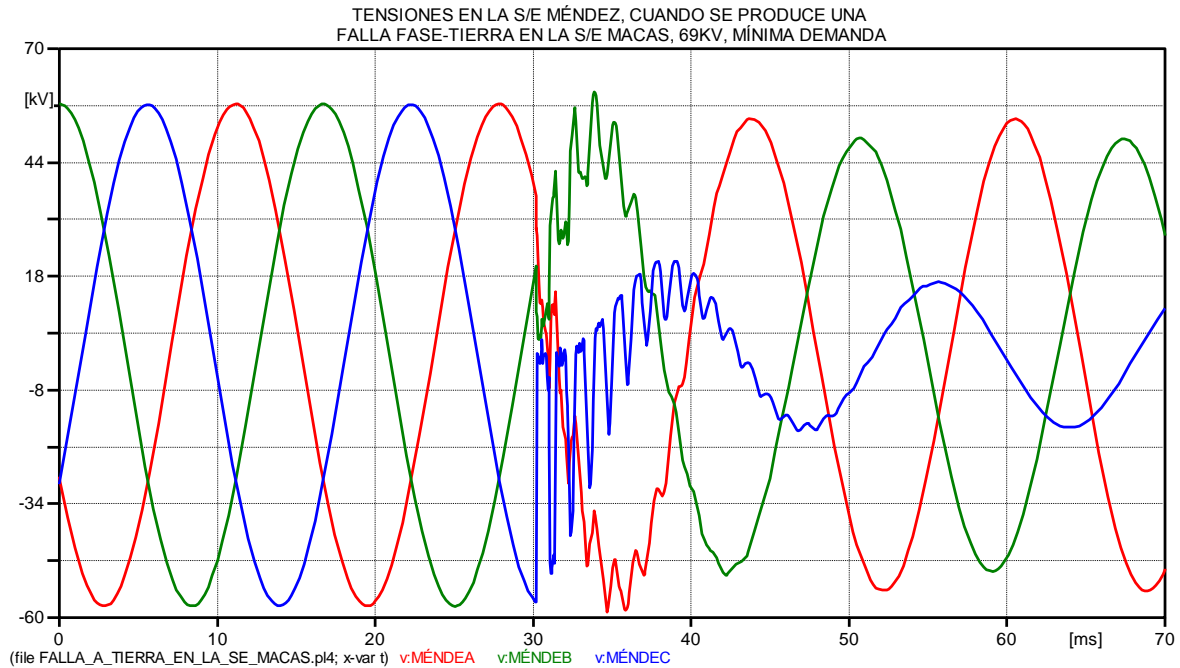


Figura 4. 84 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)

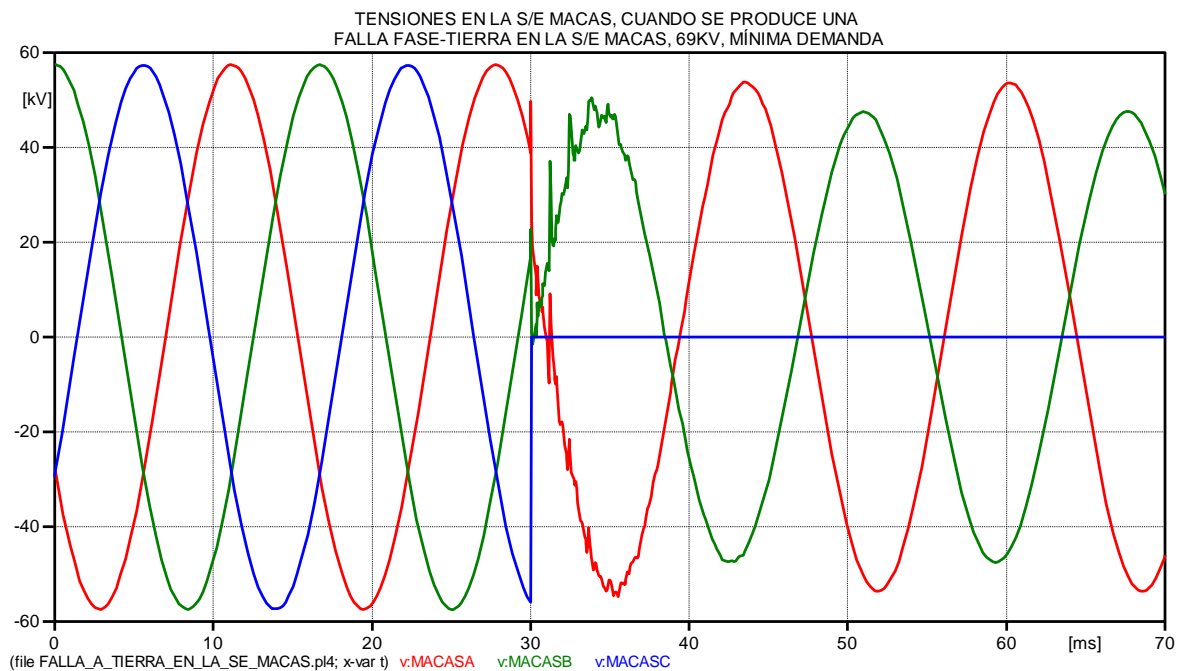


Figura 4. 85 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV)

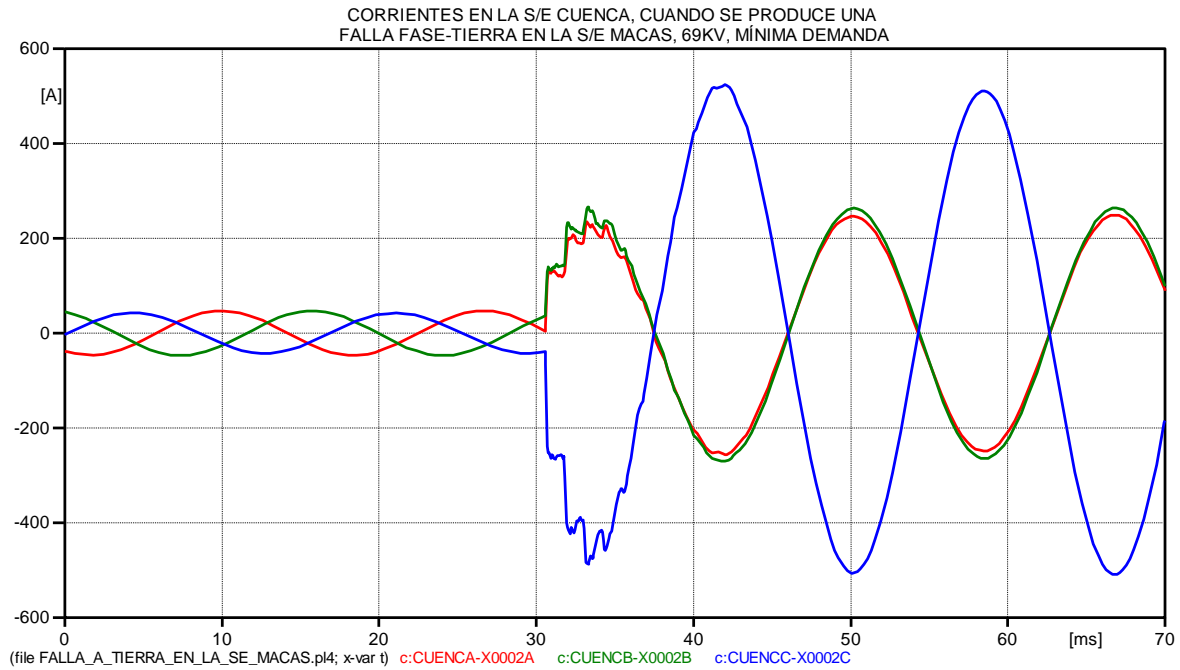


Figura 4. 86 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV).

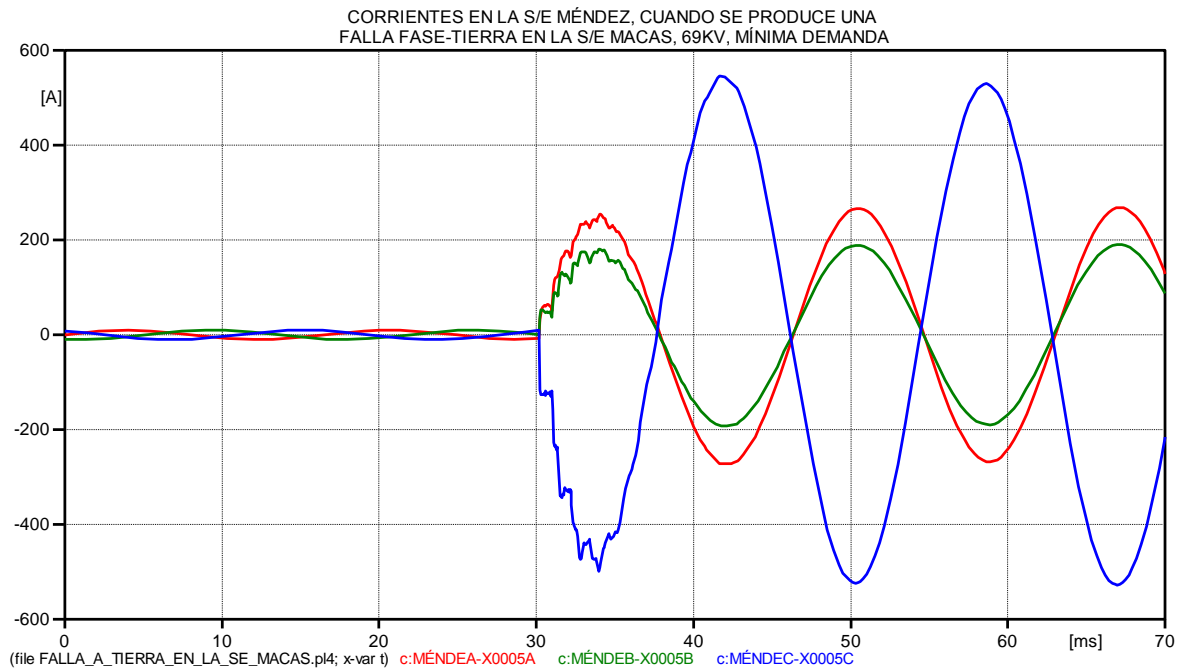


Figura 4. 87 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV).

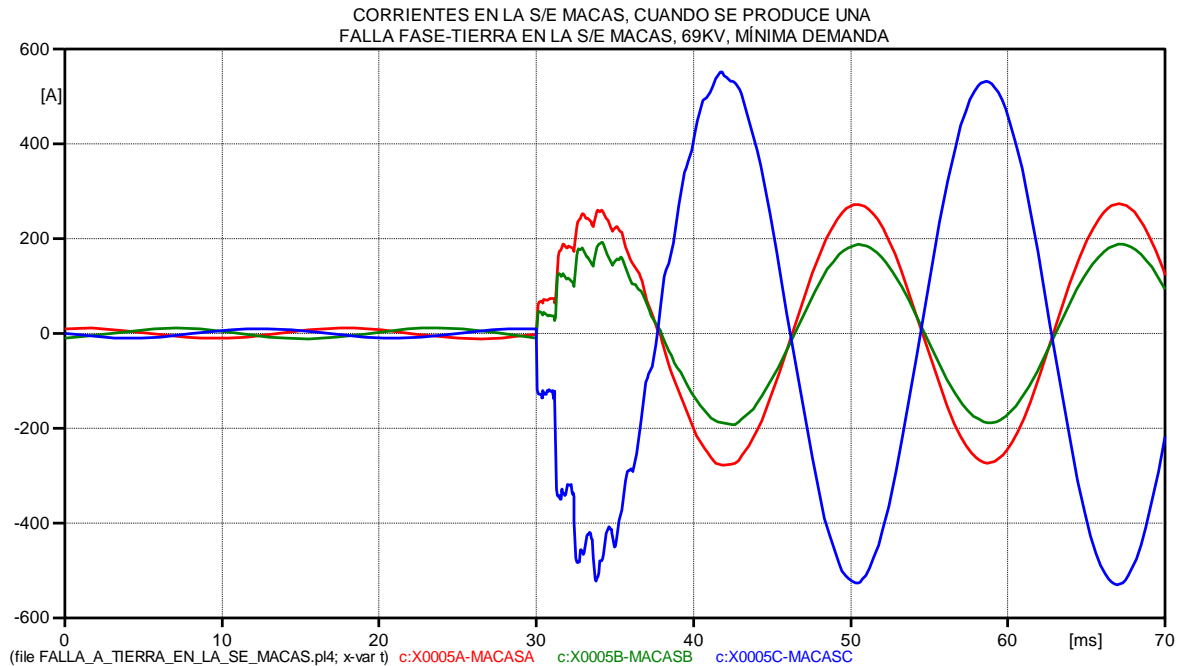


Figura 4. 88 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (69kV).

RESUMEN DE RESULTADOS

Como se observa en las Figuras anteriores, cuando se produce una falla fase-tierra en la subestación Macas, no se producen mayores sobretensiones en ninguna de las subestaciones, lo que se observa es la deformación de las formas de onda de tensión, por la introducción de armónicos de altas frecuencias, pero de muy baja amplitud.

También con respecto a las sobrecorrientes se observa en las Figuras desde la 4.86 hasta la 4.88, que se produce un igual crecimiento de la corriente de la fase C (fase fallada) en cada una de las subestaciones.

Se observa también que existe una mayor sobrecorriente en las fases A y B, comparado con los casos anteriores.

Los resultados de valores máximos en cada subestación, luego de la falla se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 45 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 69kV, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS, MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-0,994	1,028	-1,025	-256,7	-269,4	524,1
GUALACEO	-1,000	1,061	-0,988	-255,2	209,0	539,1
LIMON	-1,077	1,060	-0,932	-264,1	-202,2	541,9
MENDEZ	-1,044	1,079	-0,884	-272,8	-193,8	545,1
MACAS	-0,970	0,903	0,000	-278,7	192,8	552,4

4.2.2.5.2 Falla fase-tierra en la Subestación Macas a nivel de 138kV.

Para esta simulación se considera que la falla fase-tierra se produce en el lado de 69kv de la subestación Macas.

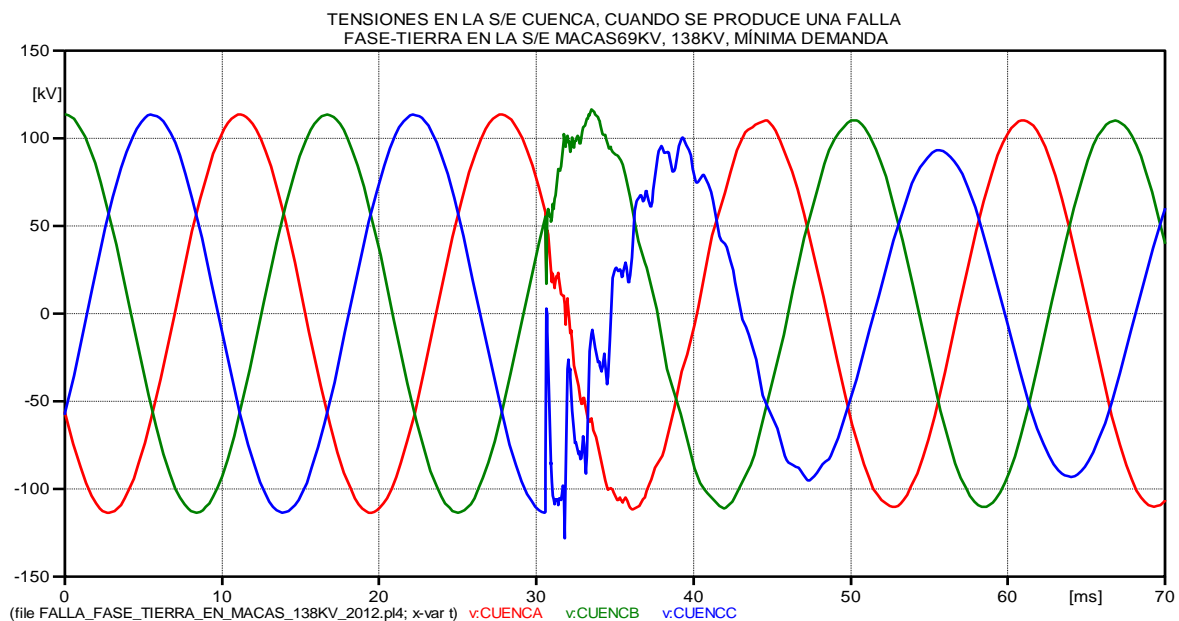


Figura 4. 89 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA
FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

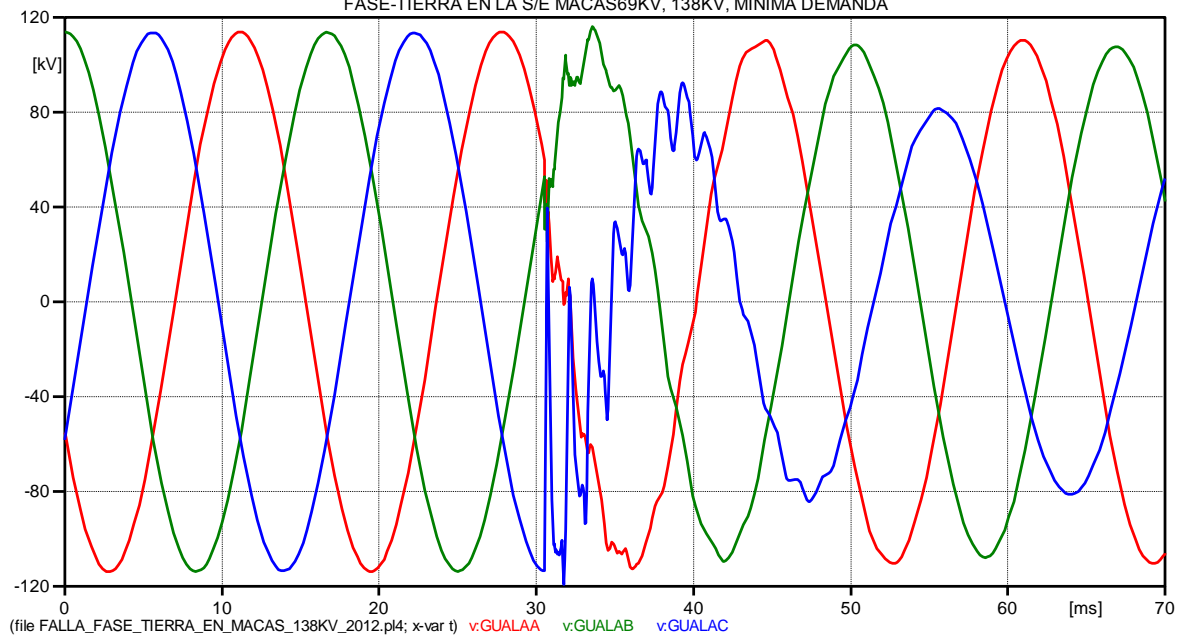


Figura 4. 90 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA
FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

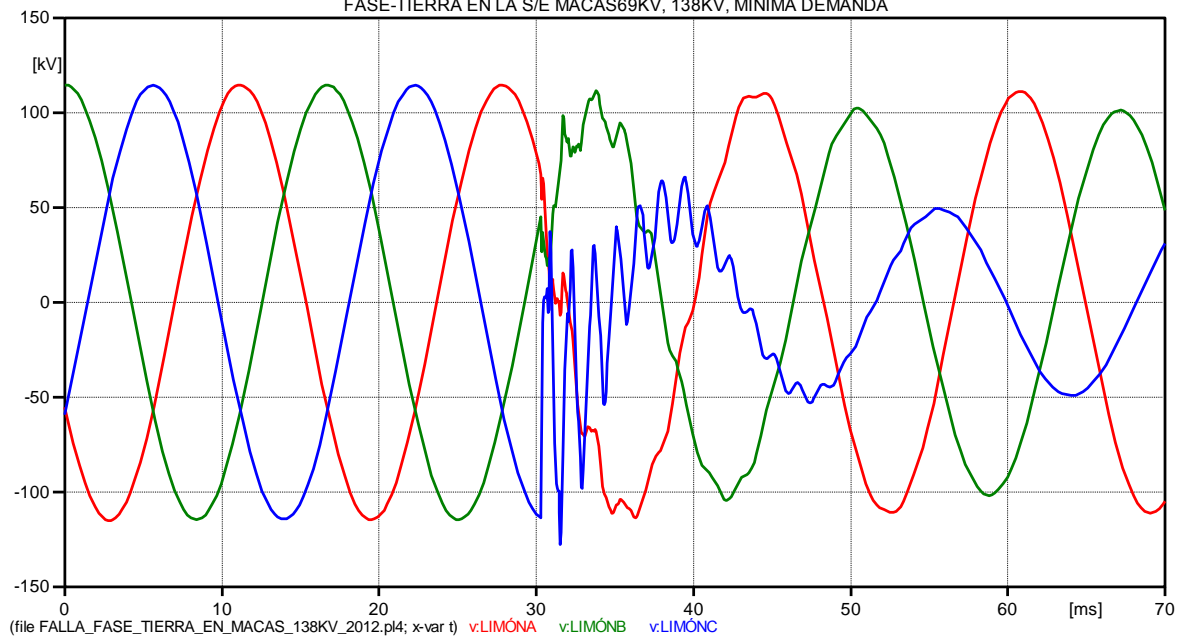


Figura 4. 91 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA
FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

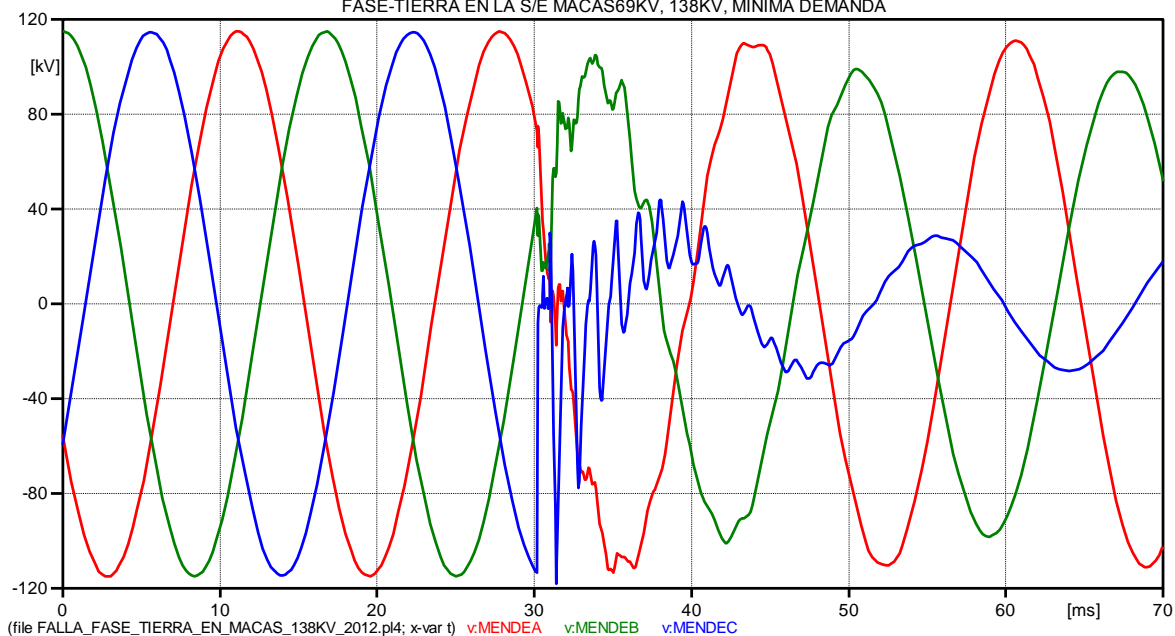


Figura 4. 92 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA
FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

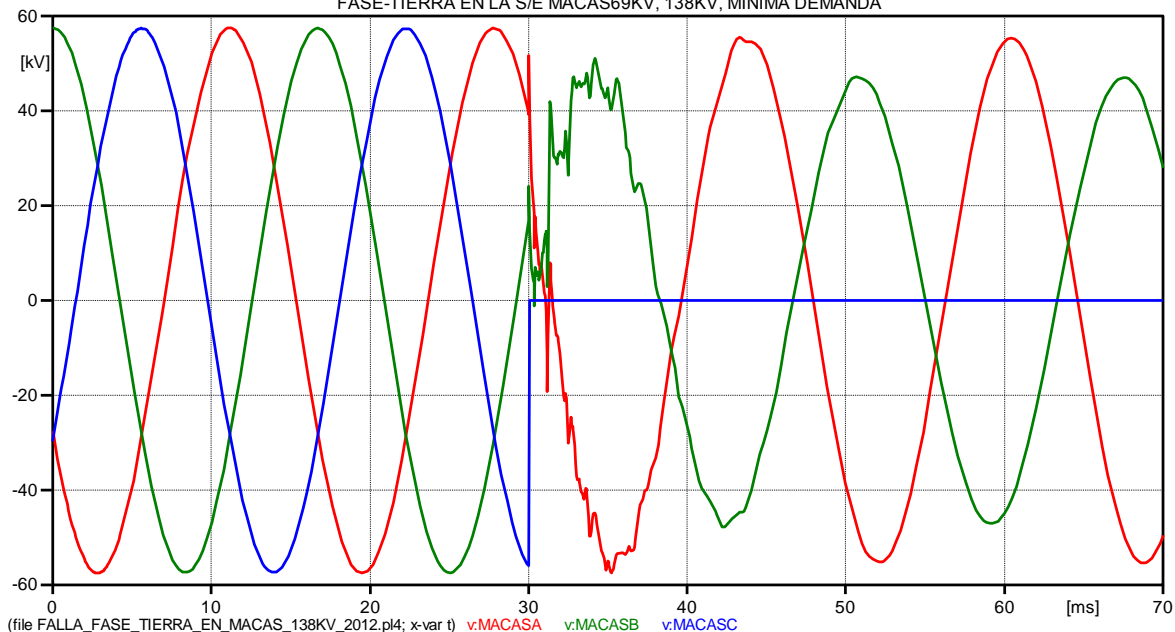


Figura 4. 93 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA
FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

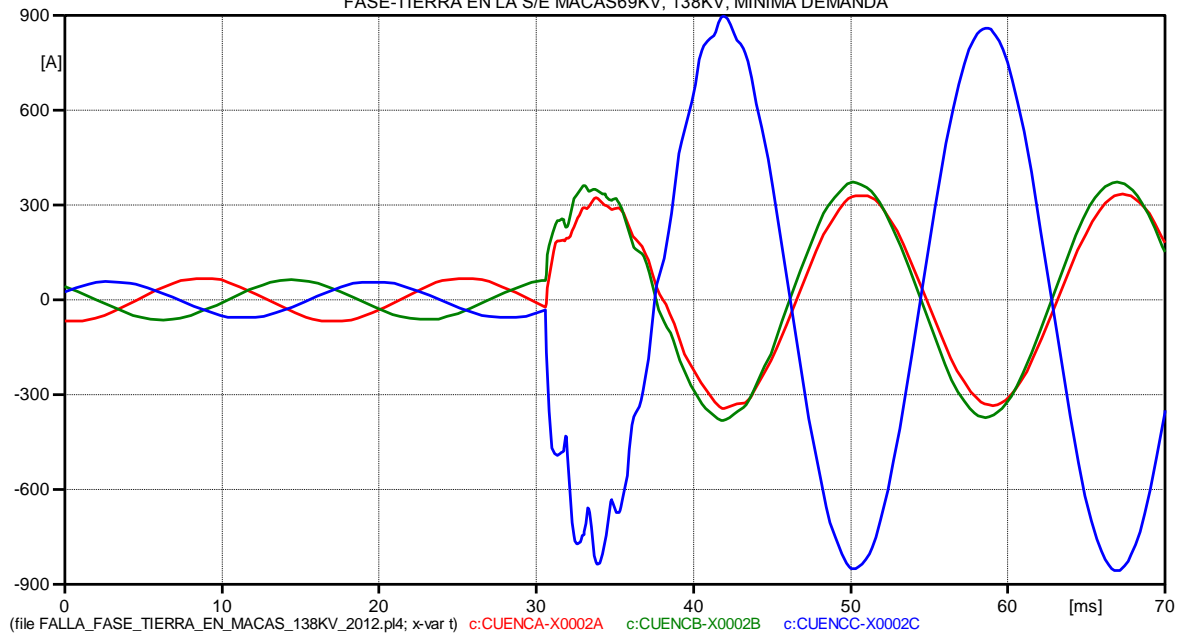


Figura 4. 94 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).

CORRIENTES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA
FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

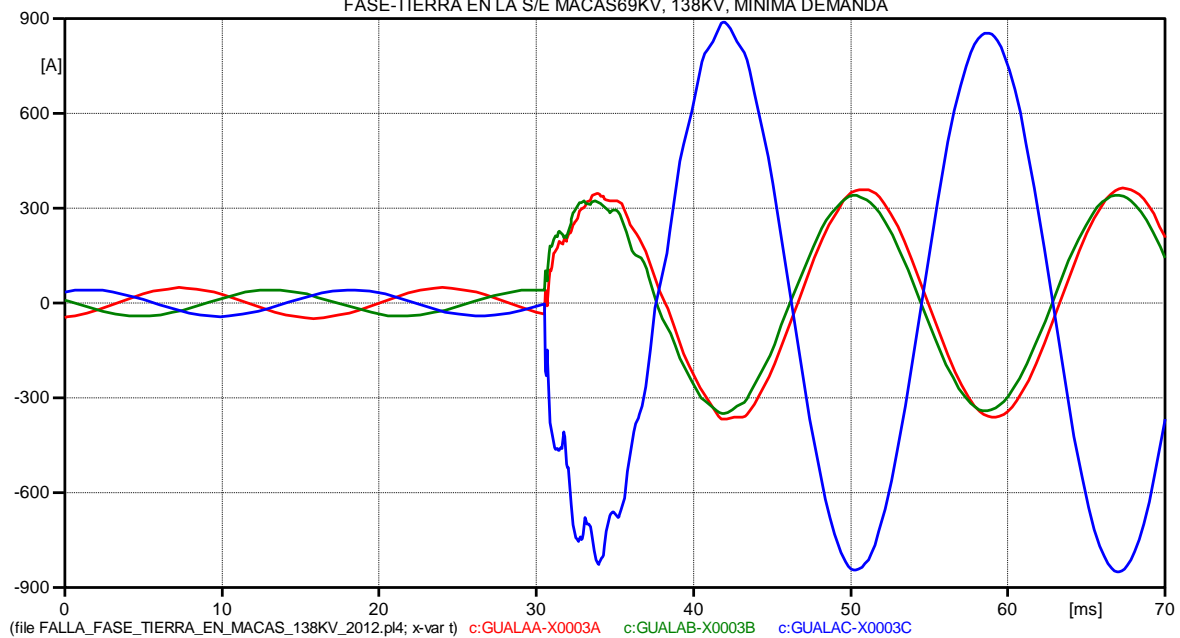


Figura 4. 95 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA
FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

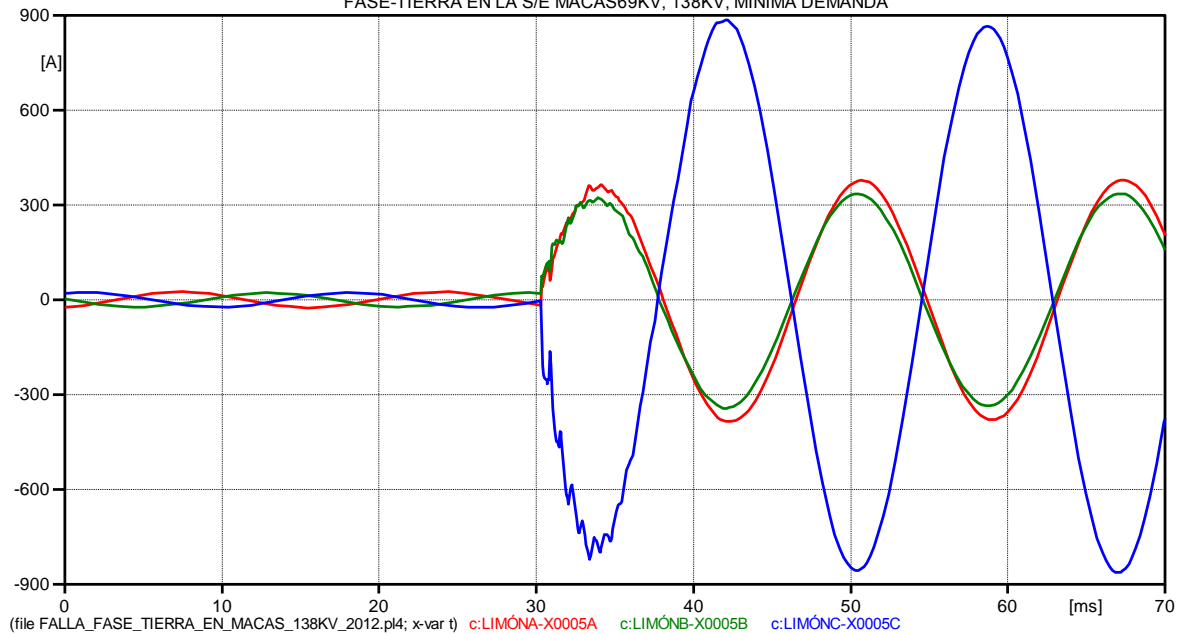


Figura 4. 96 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).

CORRIENTES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA
FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

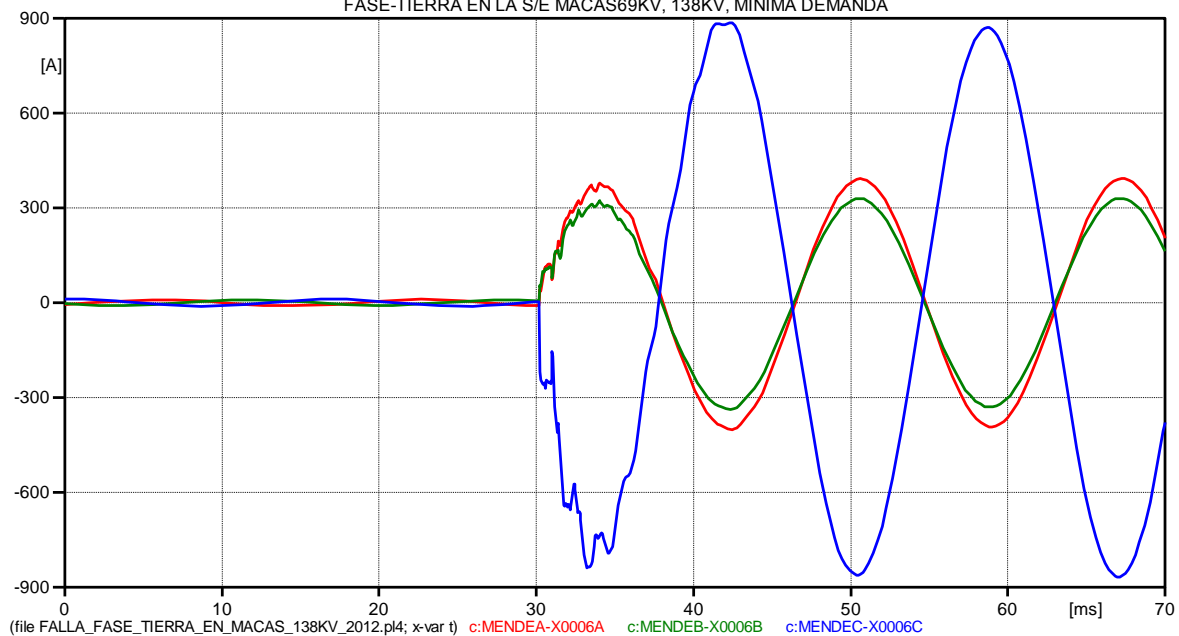


Figura 4. 97 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS 69KV, 138KV, MÍNIMA DEMANDA

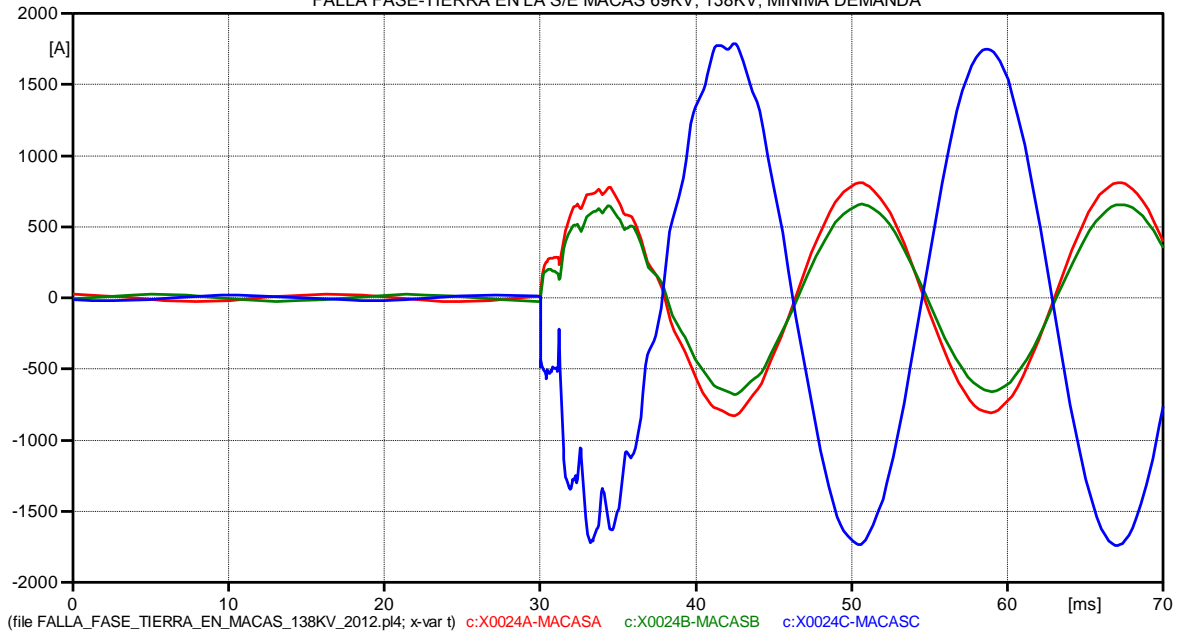


Figura 4. 98 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas (138kV-2012).

Los resultados de valores máximos en cada subestación, después de la falla se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 46 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2012, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS (138kV-2012), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-0,991	1,036	-1,135	-343,8	-382,1	898,5
GUALACEO	-1,000	1,031	-1,059	-368,5	-350,7	889,0
LIMÓN	-1,008	0,993	-1,133	-385,6	-344,0	886,6
MÉNDEZ	-1,005	0,932	-1,047	-401,7	-336,8	885,2
MACAS (69kV)	-1,019	0,907	0,000	-831,5	-679,9	1789,1



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 47 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2012, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS (138kV-2012), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-0,984	1,023	-1,116	-319,20	-412,20	902,80
GUALACEO	-0,988	1,010	-1,035	-358,00	-354,60	881,10
LIMÓN	-0,998	0,974	-1,099	-379,60	-345,00	883,60
MÉNDEZ	-1,002	0,923	-1,035	-399,10	-334,20	885,00
MACAS (69kV)	-1,016	0,912	0,000	-827,0	-677,0	1791,3

Considerando las demandas de los años 2015 y 2020, se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro 4. 48 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2015, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS (138kV-2015), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-0,992	1,037	-1,079	-348,5	-400,9	932,0
GUALACEO	-0,999	1,021	-1,024	-382,0	-364,8	918,7
LIMÓN	-1,010	0,979	-1,101	-398,9	-356,9	922,1
MÉNDEZ	-1,005	0,926	-1,055	-417,9	-351,7	932,5
MACAS (69kV)	-1,020	0,913	0,000	-868,5	-710,9	1890,7

Cuadro 4. 49 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2015, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS (138kV-2015), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	0,989	1,025	-1,062	-322,5	-433,3	935,5
GUALACEO	-0,994	1,003	-1,000	-372,1	-368,0	906,1
LIMÓN	-1,056	1,011	-0,966	-391,3	-358,7	916,2
MÉNDEZ	-1,002	0,923	-1,034	-412,4	-350,5	925,8
MACAS(69kV)	-1,011	0,915	0,000	-857,2	-706,1	1879,7



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 50 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2020, en demanda mínima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS (138kV-2020), MÍNIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-0,996	1,030	-1,021	-358,4	-417,0	951,9
GUALACEO	-1,001	1,014	-1,003	-396,7	-376,3	940,0
LIMÓN	-1,021	0,968	-1,044	-411,0	-371,8	953,6
MÉNDEZ	-1,019	0,919	-1,036	-427,5	-364,3	966,8
MACAS (69kV)	-0,998	0,914	0,000	-888,2	-729,0	1960,6

Cuadro 4. 51 Sobretensiones y sobrecorrientes resultantes, cuando se produce una falla fase-tierra en la S/E Macas, al nivel de 138kV-2020, en demanda máxima.

FALLA FASE-TIERRA EN LA S/E MACAS (138kV-2020), MÁXIMA DEMANDA						
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-0,997	1,018	-1,019	-318,2	-466,2	958,6
GUALACEO	-1,003	0,995	-0,998	-379,9	-388,2	939,7
LIMÓN	-1,012	0,955	-1,002	-399,5	-378,0	947,7
MÉNDEZ	-1,013	0,915	-1,004	-419,7	-363,0	953,1
MACAS (69kV)	-0,981	0,914	0,000	-869,4	724,8	1933,4

4.3 ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES POR MANIOBRAS

Para estas simulaciones se consideran dos casos:

- Sin considerar los pararrayos en las subestaciones; los resultados obtenidos, conjuntamente con los de las simulaciones de la falla fase-tierra, se utilizarán para dimensionar los equipos (pararrayos).
- Considerando los pararrayos calculados, conectados en cada una de las subestaciones que pertenecen a la línea en estudio, para limitar las sobretensiones.

Para estas simulaciones se utilizan interruptores estadísticos, cuyo objetivo es simular su operación real en lo que se refiere a los tiempos de actuación y



discordancia entre polos, pero no la representación real del proceso de interrupción.

Al realizar estudios de sobretensiones en un SEP bajo la utilización de interruptores estadísticos se debe efectuar una cantidad apreciable de simulaciones, con diferentes tiempos de actuación de interruptores; en nuestro caso, se ha simulado para un total de 100 maniobras de cierre; cabe mencionar que en el ATP es posible considerar varios interruptores estadísticos en el mismo caso, ya sean independientes o con tiempos dependientes con un interruptor como maestro y los restantes como esclavos; para la energización de la línea de subtransmisión en estudio se consideró la utilización de interruptores estadísticos maestros, con un tiempo de cierre de 29 milisegundos (1,7 ciclos) y una desviación estándar de 1,38 milisegundos (0,1 ciclos).

En el ATP al hacer uso de interruptores estadísticos nos proporciona la facilidad de escoger el tipo de distribución estadística que más se ajuste a nuestras necesidades según sea el tipo de simulación; para el análisis se utilizará la distribución gaussiana o también conocida como distribución normal, la cuál es frecuentemente utilizada en las aplicaciones estadísticas, es caracterizada por su valor medio, el cual representa el valor indicativo de su tendencia central; y su desviación estándar, que nos indica la dispersión de los resultados; dichos valores se los aprecia de mejor manera en la siguiente Figura:

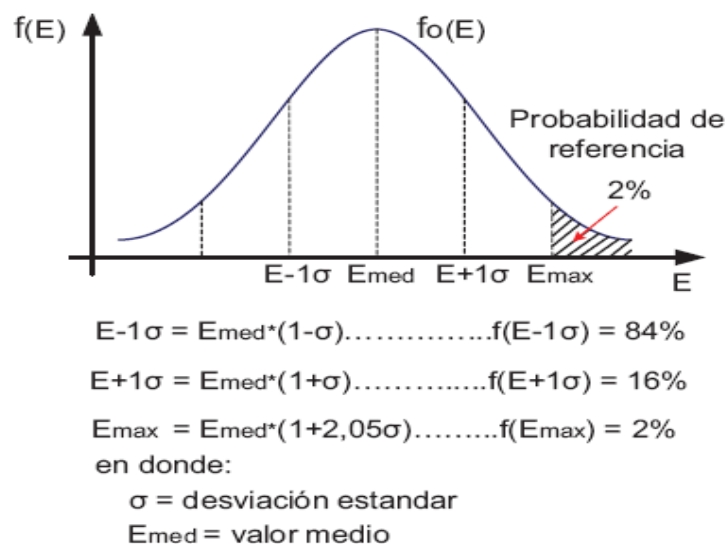


Figura 4. 99 Distribución Gaussiana de frecuencia de sobretensiones.

Fuente: Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Elétricas S.A. [4], Brasil, 1987, Cap. 9, Pág. 154.



La influencia de sobretensiones por maniobra en líneas de transmisión aumenta según se incremente el nivel de voltaje de la red; se debe tener en cuenta que las sobretensiones debido a la energización de líneas de transmisión son de naturaleza probabilística, ya que, para un mismo tipo de maniobra realizada con las mismas características se pueden tener diferentes valores de sobretensiones.

Al energizar una línea de transmisión con el extremo receptor en vacío se propagan ondas viajeras a lo largo de la línea, cuya onda de voltaje reflejada es igual a la onda de voltaje incidente. A continuación, se procede a realizar las simulaciones de energización en vacío mediante el ATP de la línea en estudio, desde cada una de las subestaciones que permitan realizar las respectivas energizaciones; de esta manera se obtienen las sobretensiones más altas que se producen por maniobras de la línea en estudio.

4.3.1 Energización en vacío de la línea Cuenca-Macas, desde la subestación Cuenca Rayoloma, sin pararrayos.

4.3.1.1 Nivel de 69kV.

La siguiente Figura en ATPDraw, se utiliza para la simulación de la energización en vacío, utilizando interruptores estadísticos, sin considerar los pararrayos en las subestaciones.

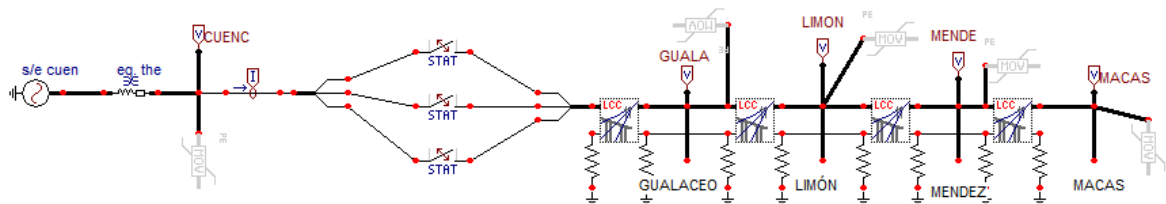


Figura 4. 100 Diagrama en ATPDraw para la energización desde la subestación Cuenca Rayoloma

Fuente: Elaboración de los autores mediante el programa Alternative Transient Program (ATP).

La forma de onda tensión que se produce luego de la energización, en la subestación Macas la cual está en vacío es la siguiente:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

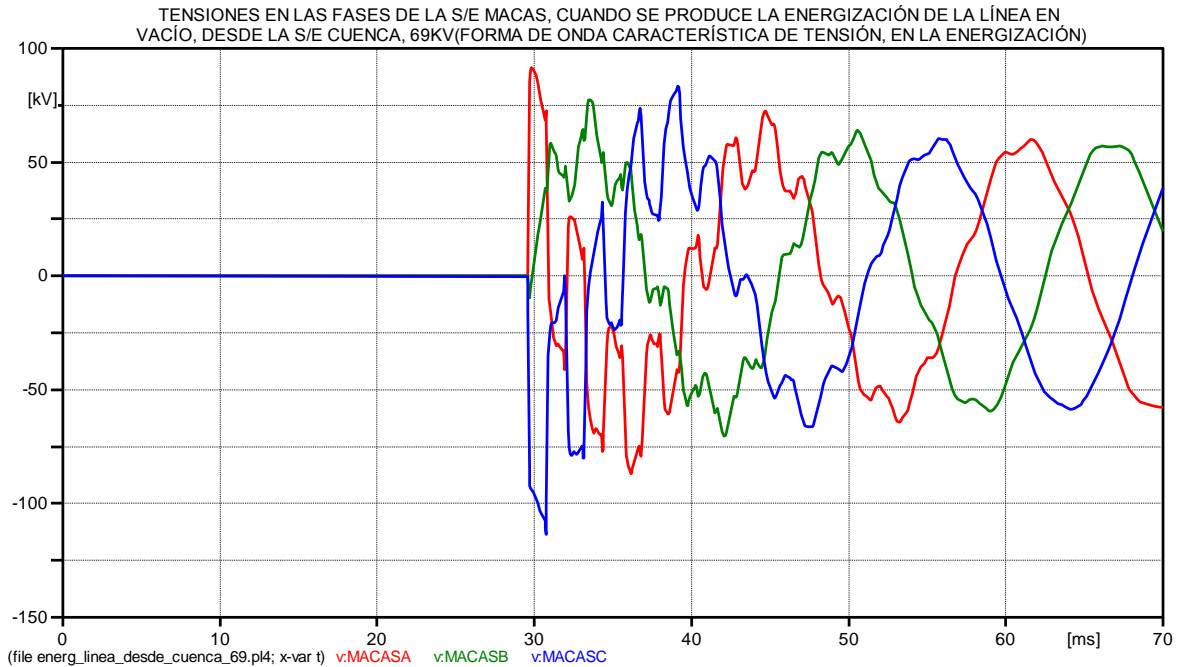


Figura 4. 101 Tensiones en las fases de la S/E Macas, cuando se produce la energización de la línea en vacío, desde la S/E Cuenca, 69kV (forma de onda característica de tensión, en la energización)

Esta es una forma de onda característica de tensión, en la energización de una línea de transmisión en vacío, ya que para las diferentes simulaciones de energizaciones se obtiene ondas de tensión similares a la de la Figura anterior; variando únicamente su valor en amplitud y por supuesto la frecuencia de las armónicas introducidas en la energización. Por este motivo en las siguientes simulaciones de energizaciones en vacío, se omiten las formas de onda de tensión y se expresan los resultados obtenidos de la simulación en cuadros.

Después de realizar la simulación se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro 4. 52 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 69kV, sin pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE CUENCA, SIN PARARRAYOS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,25	1,45	5	1,56	1,95	1,78	2,35	1,86	2,5	1,98	2,6



Donde tenemos que:

Emed: Valor medio o promedio, en por unidad, obtenido en 100 maniobras por polo del interruptor.

E_{max}: Valor máximo, en por unidad, obtenido en 100 maniobras por polo del interruptor.

Des.Std: Desviación Estándar en porcentaje

Se observa del cuadro anterior, que la tensión crece conforme crece la longitud de la línea, ya que en las energizaciones en vacío la tensión varía con el cuadrado de la longitud.

4.3.1.2 Nivel de 138 kV.

El diagrama utilizado para esta simulación es el de la Figura 4.6; sin las cargas en las subestaciones y sin la generación en Hidroabanico.

Los resultados obtenidos se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 53 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV, sin pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS EN VACÍO DESDE LA S/E CUENCA, 138kV-2012, SIN PARARRAYOS												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 138kV		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,36	1,65	9	1,54	1,95	1,79	2,3	1,85	2,45	2,00	2,60	1,52	2,60

4.3.2. Energización en vacío de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Macas, sin pararrayos.

Estas simulaciones se realizaron para obtener las sobretensiones en las subestaciones que pertenecen a la línea en estudio, cuando se conecta Hidroabanico al subsistema.

4.3.2.1 Nivel de 69 kV.



El diagrama utilizado para esta simulación es la siguiente:

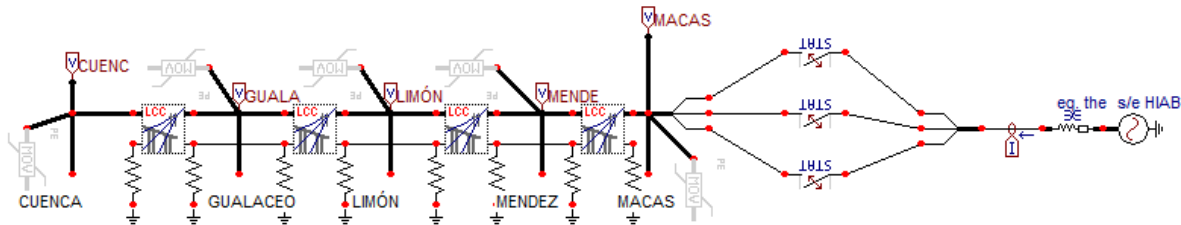


Figura 4. 102 Diagrama en ATP de la energización de la línea desde la subestación Macas

Fuente: Elaboración de los autores mediante el programa Alternative Transient Program (ATP).

Cuadro 4. 54 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 69kV, sin pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE MACAS, SIN PARARRAYOS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
2,01	2,7	7,5	1,91	2,55	1,86	2,4	1,78	2,25	1,36	1,65

4.3.2.2. Nivel de 138 kV.

El diagrama en ATPDraw que se utiliza para esta simulación es el de la Figura 4.6; considerando toda la línea en vacío y la generación de la central Hidroabanico.

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 55 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Macas, al nivel de 138kV, sin pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS EN VACÍO DESDE LA S/E MACAS, 138kV-2012, SIN PARARRAYOS												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 138kV		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,95	2,7	9,6	1,93	2,675	1,79	2,425	1,685	2,225	1,49	1,88	1,48	1,90



4.3.3. Energización en vacío de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Gualaceo, sin pararrayos.

4.3.3.1 Nivel de 69 kV.

Para esta simulación se considera el diagrama en ATPDraw de la Figura 4.100, pero ahora los interruptores estadísticos se encuentran en la salida de la subestación Gualaceo, asumiendo que la corriente fluye desde la subestación Cuenca Rayoloma.

Cuadro 4. 56 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV, sin pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE GUALACEO, SIN PARARRAYOS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,17	1,35	4,3	1,39	1,75	1,79	2,35	1,87	2,35	1,98	2,5

4.3.3.2 Nivel de 138 kV.

Se realiza la simulación utilizando las mismas consideraciones que para la simulación a 69kv, pero aplicadas al subsistema funcionando a 138kV.

Los resultados obtenidos se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 57 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV, sin pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS EN VACÍO DESDE LA S/E GUALACEO, 138kV-2012, SIN PARARRAYOS												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 138kV		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,38	1,65	9	1,45	1,8	1,78	2,25	1,9	2,4	2,05	2,65	2,04	2,70



4.3.4. Energización en vacío de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Méndez, sin pararrayos.

4.3.4.1 Nivel de 69 kV.

Al igual que antes se utiliza el mismo diagrama en ATPDraw de la Figura 4.100, solo que ahora los interruptores estadísticos se encuentran en la salida de la subestación Méndez.

Cuadro 4. 58 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 69kV.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE MENDEZ, SIN PARARRAYOS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,19	1,4	5,3	1,35	1,65	1,41	1,7	1,4	1,8	1,73	2,25

4.3.4.2 Nivel de 138 kV.

Para esta simulación se considera la Figura 4.6 en ATPDraw, sin las cargas en las subestaciones y sin la generación de Hidroabánico; y los interruptores estadísticos se encuentran en la salida de la subestación Méndez.

Los resultados obtenidos se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 59 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 138kV.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS EN VACÍO DESDE LA S/E MÉNDEZ, 138kV-2012, SIN PARARRAYOS												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 138kV		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,38	1,7	3,6	1,46	1,85	1,44	1,8	1,47	1,9	1,77	2,35	1,78	2,40

Las corrientes producidas en las simulaciones de energizaciones en vacío de la línea en estudio, no son de valores considerables comparados con los valores de



corrientes resultantes de la falla fase-tierra; por este motivo se omiten tales valores.

4.3.5. Energizaciones en vacío de la línea Cuenca-Macas, considerando los pararrayos en las subestaciones.

Para estas simulaciones se consideran los pararrayos en cada subestación, con el objetivo de limitar las sobretensiones, que se obtuvieron en las simulaciones anteriores.

Las especificaciones y características de los pararrayos utilizados se encuentran en los Anexos A y B.

Las consideraciones realizadas en las simulaciones de energizaciones sin los pararrayos en las subestaciones, son válidas también para este punto.

4.3.5.1 Energización desde la subestación Cuenca Rayoloma a nivel de 69kV y 138kV.

Los resultados obtenidos de la simulación de la energización de la línea desde la subestación Cuenca Rayoloma a nivel de 69kV, considerando los pararrayos en las subestaciones, se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 60 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 69kV, con pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE CUENCA, CON PARARRAYOS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	E _{max}	Des.Std	Emed	E _{max}	Emed	E _{max}	Emed	E _{max}	Emed	E _{max}
1,22	1,45	5,06	1,45	1,75	1,56	1,75	1,59	1,75	1,6	1,75

Los pararrayos de las subestaciones limitan las sobretensiones a causa de la energización de la línea; los mismos que para este fin drenan energía hacia tierra.

Estas energías máximas, drenadas por los pararrayos en cada subestación se resumen en el siguiente cuadro:



Cuadro 4. 61 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 69kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS EN LA ENERGIZACIÓN DESDE LA S/E CUENCA - 69 KV									
Cuenca 69kv		Gualaceo		Limón		Méndez		Macas 69kv	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
0,002	0,000	0,136	0,003	0,449	0,008	0,557	0,010	0,677	0,013

Realizando la energización de la línea, desde la subestación Cuenca Rayoloma al nivel de tensión de 138kV, se obtienen los siguientes resultados de sobretensiones y de energías drenadas por los pararrayos en cada subestación:

Cuadro 4. 62 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV, con pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS EN VACÍO DESDE LA S/E CUENCA, 138kV-2012, CON PARARRAYOS												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 138kV		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,32	1,6	8,15	1,46	1,75	1,58	1,8	1,6	1,8	1,63	1,80	1,62	1,80

Cuadro 4. 63 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS EN LA ENERGIZACIÓN DESDE LA S/E CUENCA – 138kV											
CUENCA 69kV		GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS138kV		MACAS69kV	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
0,039	0,000	0,645	0,006	1,766	0,016	1,994	0,018	2,342	0,022	0,065	0,001

4.3.5.2 Energización desde la subestación Gualaceo, a nivel de 69kV y 138kV.

Los resultados de la energización de la línea desde la subestación Gualaceo al nivel de tensión de 69kV, tanto de sobretensiones y energías drenadas por los pararrayos en cada subestación se resumen en los siguientes cuadros:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 64 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV, con pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE GUALACEO, CON PARARRAYOS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,13	1,35	4,2	1,27	1,55	1,53	1,75	1,57	1,75	1,6	1,75

Cuadro 4. 65 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS EN LA ENERGIZACIÓN DESDE LA S/E GUALACEO - 69 kV									
CUENCA 69kV		GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
0,002	0,000	0,003	0,000	0,340	0,006	0,498	0,009	0,648	0,012

Los resultados de la energización de la línea desde la subestación Gualaceo al nivel de tensión de 138kV, tanto de sobretensiones y energías drenadas por los pararrayos en cada subestación se resumen en los siguientes cuadros:

Cuadro 4. 66 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV, con pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS EN VACÍO DESDE LA S/E GUALACEO, 138kV-2012, CON PARARRAYOS												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 138kV		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,33	1,6	7,79	1,38	1,65	1,59	1,8	1,63	1,8	1,66	1,80	1,44	1,80

Cuadro 4. 67 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS EN LA ENERGIZACIÓN DESDE LA S/E GUALACEO - 138 kV											
CUENCA		GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS138KV		MACAS69KV	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
0,026	0,000	0,041	0,000	1,396	0,013	1,697	0,016	2,058	0,019	0,057	0,001



4.3.5.3 Energización desde la subestación Méndez, a nivel de 69kV y 138kV.

Los resultados de estas simulaciones se resumen en los siguientes cuadros:

Cuadro 4. 68 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 69kV, con pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE MENDEZ, CON PARARRAYOS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,18	1,4	3,78	1,34	1,65	1,38	1,65	1,37	1,65	1,57	1,75

Cuadro 4. 69 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 69kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS EN LA ENERGIZACIÓN DESDE LA S/E MÉNDEZ – 69kV									
CUENCA 69kV		GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
0,002	0,000	0,003	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,423	0,008

Cuadro 4. 70 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 138kV, con pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS EN VACÍO DESDE LA S/E MÉNDEZ, 138kV-2012, CON PARARRAYOS												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 138kV		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,36	1,65	3,6	1,43	1,7	1,41	1,7	1,37	1,65	1,62	1,80	1,62	1,80

Cuadro 4. 71 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Méndez, al nivel de 138kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS EN LA ENERGIZACIÓN DESDE LA S/E MÉNDEZ - 138 kV											
CUENCA		GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS138KV		MACAS69KV	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
0,015	0,000	0,030	0,000	0,017	0,000	0,009	0,000	1,314	0,012	0,037	0,001



4.3.5.4 Energización desde la subestación Macas, a nivel de 69kV y 138kV.

Cuadro 4. 72 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 69kV, con pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE MACAS, CON PARARRAYOS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,59	1,7	9,9	1,59	1,7	1,56	1,7	1,55	1,75	1,35	1,6

Cuadro 4. 73 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 69kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS EN LA ENERGIZACIÓN DESDE LA S/E MACAS - 69 kV									
CUENCA 69kV		GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
0,692	0,013	0,680	0,013	0,534	0,010	0,456	0,008	0,029	0,001

Cuadro 4. 74 Resultados estadísticos al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 138kV, con pararrayos.

ENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS EN VACÍO DESDE LA S/E MACAS, 138kV-2012, CON PARARRAYOS												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 138kV		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,60	1,70	0,20	1,60	1,73	1,58	1,73	1,55	1,75	1,41	1,70	1,40	1,70

Cuadro 4. 75 Energía drenada por los pararrayos de las S/Es, al energizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas en vacío, desde la S/E Macas, al nivel de 138kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS EN LA ENERGIZACIÓN DESDE LA S/E MACAS - 138 kV											
CUENCA		GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS138kV		MACAS69kV	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
2,930	0,027	2,899	0,027	1,900	0,018	0,961	0,009	0,237	0,002	0,007	0,000



4.3.6. Maniobras de desenergización de la línea de subtransmisión Cuenca-Macas

Para las simulaciones de desenergización se utilizan las consideraciones realizadas para la energización de la línea, con respecto a los interruptores estadísticos y los tiempos de simulación.

También se asume que el sistema está funcionando normalmente antes de abrir el interruptor; de esta manera las cargas máximas y los pararrayos se encuentran conectados en las subestaciones.

Además de las simulaciones realizadas de desenergizaciones de la línea, se observó que no se producen mayores sobrecorrientes, comparados con las sobrecorrientes que se obtuvieron en las simulaciones de fallas fase-tierra; por este motivo se omiten los resultados de corrientes de todas las simulaciones de desenergizaciones de la línea en estudio.

4.3.6.1 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Cuenca Rayoloma, a nivel de 69kV.

Esta simulación se realiza para observar cómo se alteran los valores de las tensiones, cuando por alguna circunstancia se tenga que separar este subsistema del SIN, de esta manera la energía de la central Hidroabánico se despacharía solamente a las subestaciones que se encuentran después de la subestación Cuenca Rayoloma, y que pertenecen a este subsistema en estudio; esto tanto para el nivel de tensión a 69kV como a 138kV.

En el cuadro siguiente se resumen las sobretensiones máximas en cada una de las subestaciones:

Cuadro 4. 76 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 69kV.

DESENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE CUENCA, CON CARGAS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,03	1,8	3,5	0,97	1,15	0,97	1,15	0,97	1,15	0,97	1,15



La mayor sobretensión se produce en la subestación Cuenca Rayoloma, por lo tanto el pararrayo de esta subestación controla la sobretensión, drenando una de energía de 147,94 J.

4.3.6.2 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Cuenca Rayoloma, a nivel de 138kV.

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 77 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV.

DESENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS, CON CARGAS DESDE LA S/E CUENCA, 138kV, 2012												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV		MACAS 138kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,03	1,8	6	1,02	1,2	1,02	1,2	1,02	1,2	1,05	1,10	1,02	1,10

Al igual que en la simulación a 69kv, la mayor sobretensión se produce en la subestación Cuenca Rayoloma; drenado el pararrayo de esta subestación una energía máxima de 309,66J.

4.3.6.3 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Macas, a nivel de 69kV.

Para esta simulación se considera que los interruptores estadísticos, desconectan la línea en el lado de la subestación Macas a 69kV; quedando la central Hidroabanico suministrando energía solamente a la subestación Macas a 69kV.

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 78 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Macas, al nivel de 69kV.

DESENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA MACAS, 69kV DESDE MACAS , CON CARGAS											
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV		
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed
0,97	1,06	1	0,98	1,01	0,99	1,06	0,99	1,06	1	1,51	



UNIVERSIDAD DE CUENCA

El pararrayo de la subestación Macas, es el que más energía drena, con un valor de 16,85J.

4.3.6.4 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Macas a nivel de 138kV.

Al igual que en la desenergización a 69kV, luego de producirse la actuación de los interruptores estadísticos de la subestación Macas, la energía de la central Hidroabánico es despachada solamente a esta subestación.

Los resultados de esta simulación se resumen en el cuadro siguiente:

Cuadro 4. 79 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Macas, al nivel de 138kV.

DESENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS, CON CARGA DESDE LA S/E MACAS, 138kV, 2012												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV		MACAS 138kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,03	1,05	3,00	1,03	1,05	1,03	1,05	1,03	1,05	1,04	1,90	1,03	1,05

El pararrayo de la subestación Macas a 69kv, es el que más energía drena hacia tierra, con un valor de 15,14J.

4.3.6.5 Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Gualaceo a nivel de 69kV.

En este caso los interruptores estadísticos desconectan el tramo de la línea después de la subestación Gualaceo, de esta manera solamente las subestaciones Limón, Méndez y Macas, quedan conectadas a la central Hidroabánico.

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:



Cuadro 4. 80 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV.

DESENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS, 69kV DESDE GUALACEO, CON CARGAS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
0,98	1,11	1,00	0,98	1,11	1,03	1,11	1,03	1,16	0,98	1,06

Como se observa en el cuadro anterior, no se producen sobretensiones de consideración, y también por este motivo los pararrayos drenan a tierra energías muy bajas en el orden de 2J.

4.3.6.6. Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Gualaceo a nivel de 138kV.

Luego de la desenergización de la línea a la salida de la subestación Gualaceo, la central Hidroabánico queda conectada solamente a las subestaciones Limón, Méndez y Macas.

Los resultados obtenidos de esta simulación se resumen en los cuadros siguientes:

Cuadro 4. 81 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV.

DESENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS DESDE LA S/E GUALACEO, 138kV, 2012												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV		MACAS 138kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,03	1,05	1,00	1,03	1,05	1,08	1,15	1,08	1,10	1,06	1,10	1,05	1,10

En esta simulación los pararrayos, drenan valores de energía alrededor de los 3J.

4.3.6.7. Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Méndez a nivel de 69kV.

Al desenergizar la línea desde esta subestación, se separa la generación de la central Hidroabánico del Sistema Nacional Interconectado; por lo tanto la energía generada por esta central se quedará solamente en la subestación Macas, esta



UNIVERSIDAD DE CUENCA

observación sucede en los dos niveles de tensión de funcionamiento de la línea (69kV y 138kV).

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 82 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Méndez, al nivel de 69kV.

DESENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS, 69kV DESDE MÉNDEZ, CON CARGAS										
CUENCA 69kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
0,98	1,06	0,5	0,98	1,01	0,98	1,06	0,98	1,11	1,02	1,11

En esta simulación las sobretensiones producidas son bajas, por lo tanto las energías drenadas por los pararrayos son bajas; por ende se omiten estos valores de energías drenadas.

4.3.6.8. Desenergización de la línea Cuenca-Macas desde la subestación Méndez a nivel de 138kV.

Cuadro 4. 83 Resultados estadísticos al desenergizar la línea de subtransmisión Cuenca-Macas, desde la S/E Méndez, al nivel de 138kV.

DESENERGIZACIÓN DE L/T CUENCA-MACAS DESDE LA S/E MÉNDEZ, 138kV, 2012												
CUENCA 138kV			GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV		MACAS 138kV	
Emed	Emax	Des.Std	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax	Emed	Emax
1,03	1,05	9,10	1,03	1,05	1,03	1,05	1,03	1,05	1,06	1,10	1,03	1,05

La energía drenada a tierra por cada uno de los pararrayos de aproximadamente 3,5J, el cual es un valor muy bajo; esto quiere decir que en esta simulación no se producen mayores sobretensiones en las subestaciones.

4.4 ANÁLISIS DE TRANSITORIOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La onda más cercana a la de una descarga atmosférica es la propuesta por la norma IEC 61-1, la cual se utilizará en las simulaciones y se presenta en la Figura 4.103, la cual tiene un valor de tiempo de frente de $1.2\mu s$ y un tiempo de cola de $50\mu s$. Esta es la onda que la fuente de corriente de la descarga atmosférica debe proporcionar para la simulación, para así poder analizar el efecto transitorio de la línea de subtransmisión.

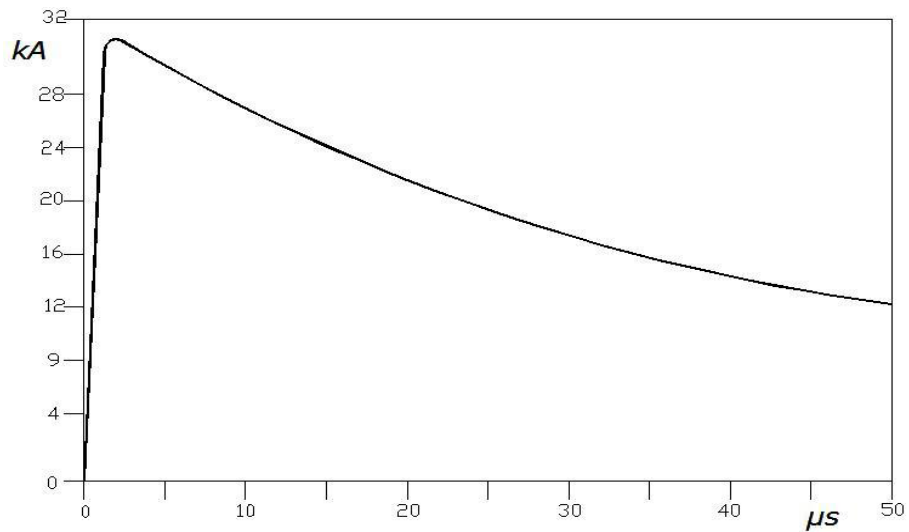


Figura 4. 103 Onda normalizada de una descarga atmosférica

FUENTE: RAMIREZ Díaz Jorge, MARTINEZ Lozada Miguel, Influencia de las sobretensiones por descargas atmosféricas y comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en líneas aéreas de transmisión y distribución, Grupo de investigación en Alta Tensión, Universidad Simón Bolívar, [11].

En las simulaciones de descargas atmosféricas en la línea en estudio, primeramente se considera que la descarga se produce en una de las fases del subsistema considerado; y en segundo lugar se considera que la descarga se produce en el cable de guarda de la línea de subtransmisión en estudio.

Además para la simulación de descarga atmosférica en una de las fases, se considera que la descarga se produce en la fase A, la cual se encuentra en la parte más alta en comparación con las otras fases.

De la misma manera que en las simulaciones de sobretensiones por maniobras, se considera que los pararrayos se encuentran conectados en cada una de las subestaciones, con la finalidad de limitar las sobretensiones producidas en la línea por descargas atmosféricas.

La descarga atmosférica se produce después de 21 ms de haber iniciado la simulación, hasta un máximo tiempo de simulación que es de 50 ms, durante este intervalo de tiempo de simulación no actúa ninguna protección del sistema.

4.4.1 Descarga atmosférica en la subestación Cuenca Rayoloma a nivel de 69kV.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E CUENCA, CUANDO SE PRODUCE UNA
DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA

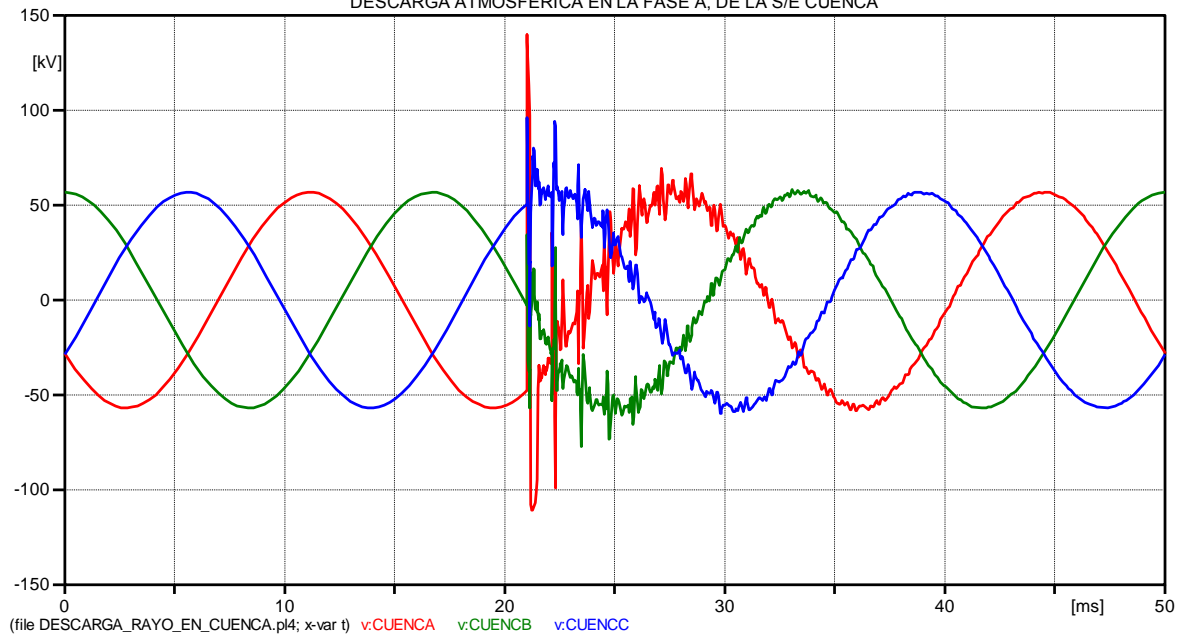


Figura 4. 104 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA
DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA

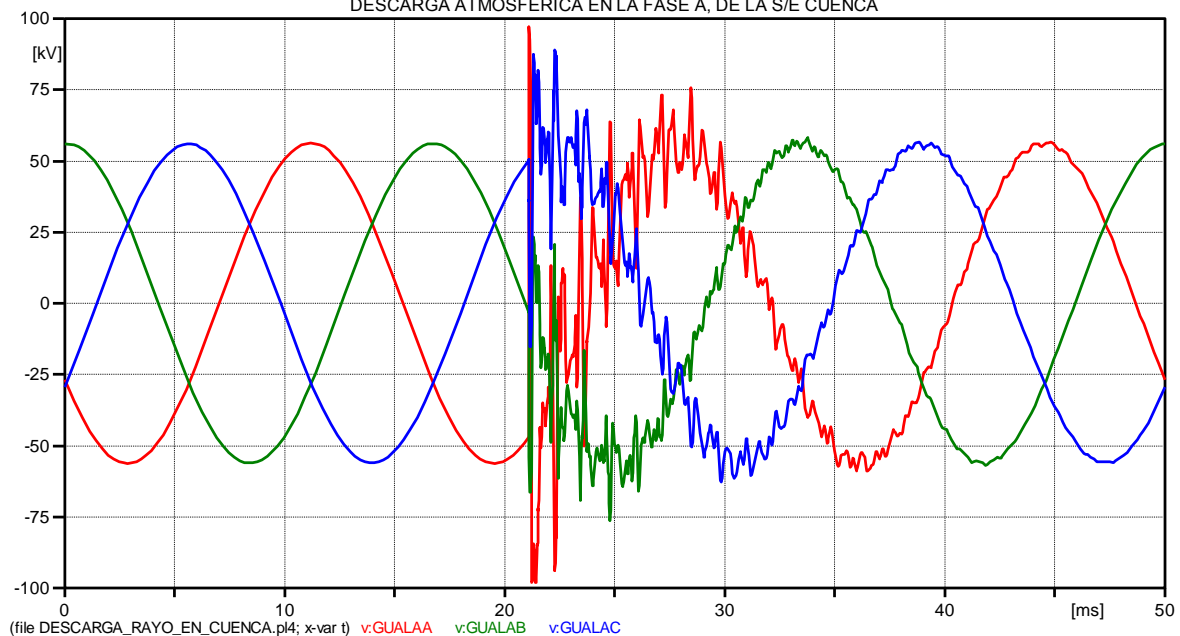


Figura 4. 105 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA
DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA

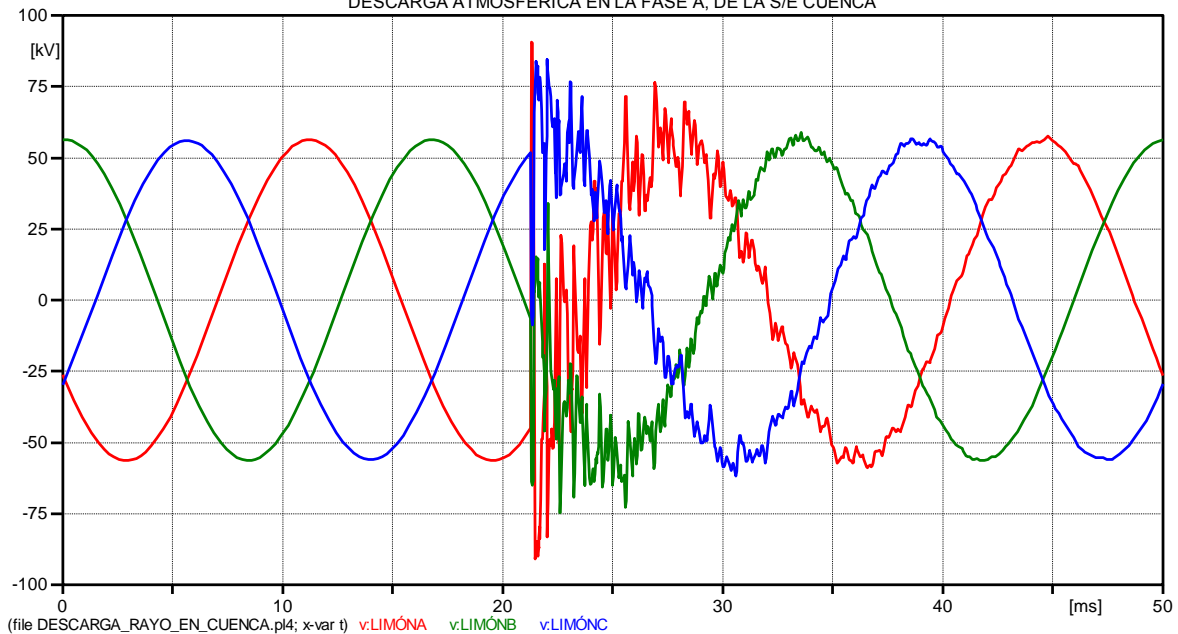


Figura 4. 106 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA
DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA

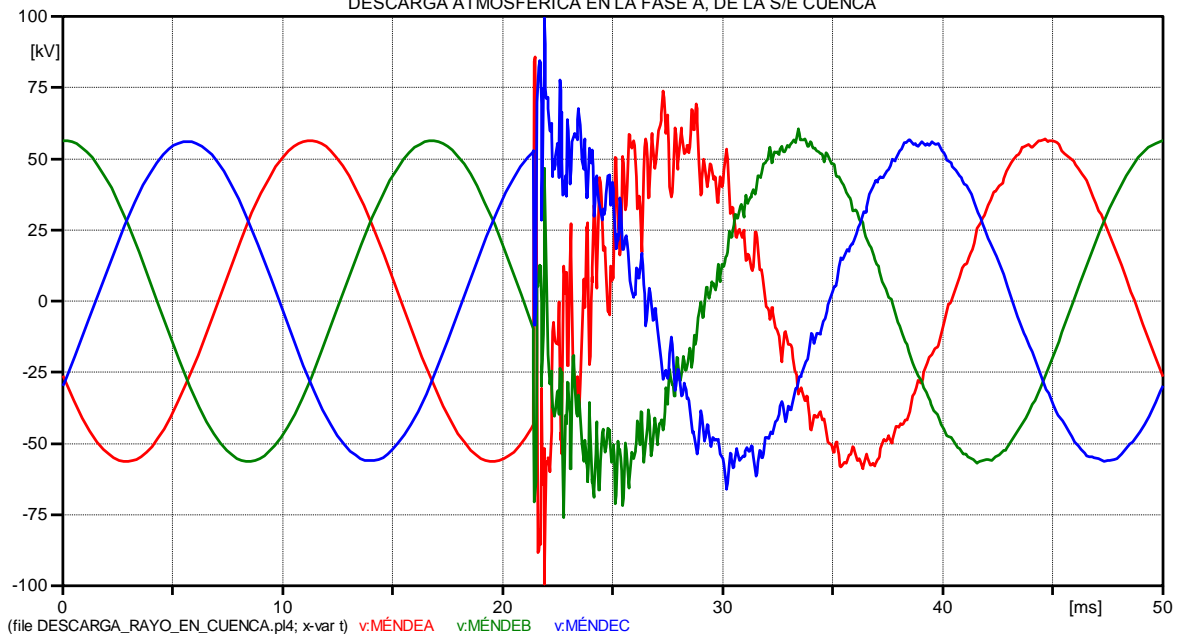


Figura 4. 107 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA
DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA

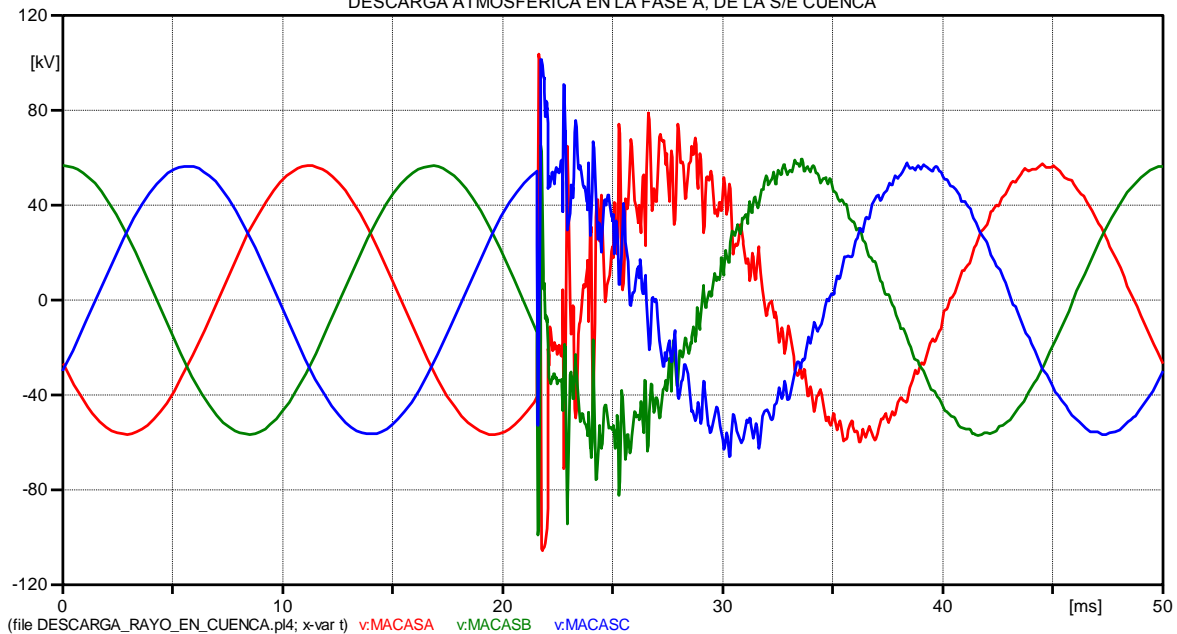


Figura 4. 108 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)

Se observa en la Figura 4.104 que la máxima sobretensión se produce en el punto y en la fase donde se produce la descarga atmosférica, y que a medida que se aleja de este punto la sobretensión disminuye; aunque en la subestación Macas se produce nuevamente una elevación de tensión, con respecto a la tensión en la subestación anterior.

Cuadro 4. 84 Resumen de sobretensiones en las subestaciones, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca, a nivel de 69kV.

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E CUENCA			
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES		
S/E	A	B	C
CUENCA	2,479	-1,370	1,704
GUALACEO	-1,742	-1,355	1,577
LIMON	-1,612	-1,327	1,500
MENDEZ	-1,765	-1,350	1,764
MACAS	-1,872	-1,761	1,798

El comportamiento de la corriente de fase en las subestaciones, es como se muestra en las siguientes figuras:

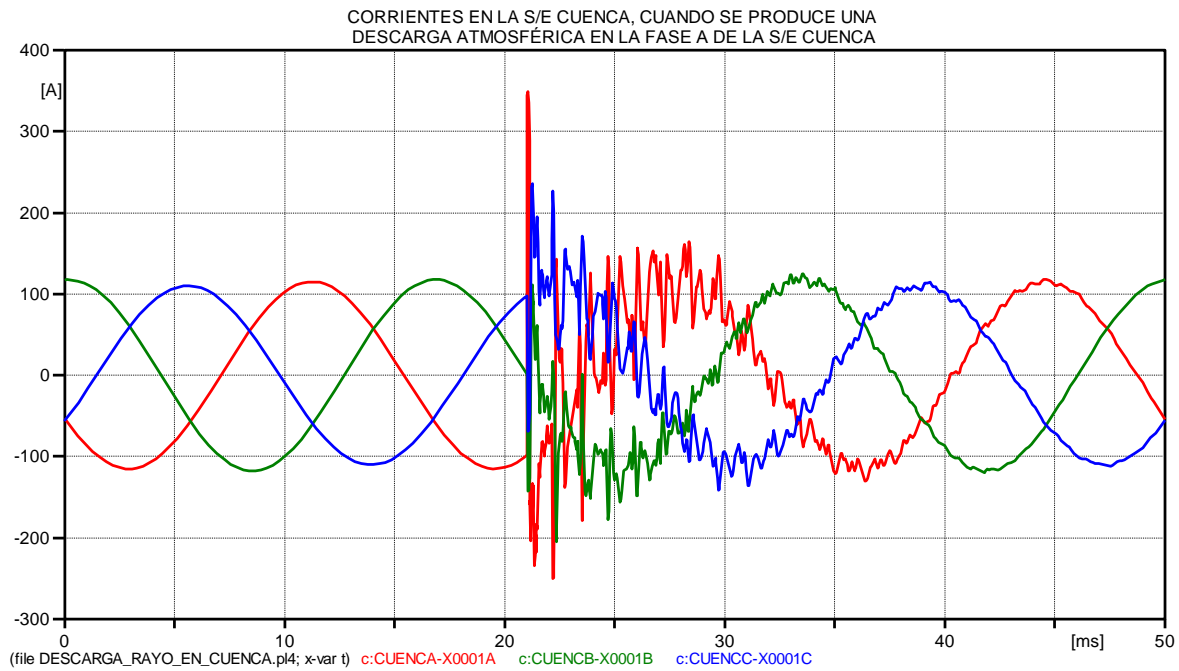


Figura 4. 109 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).

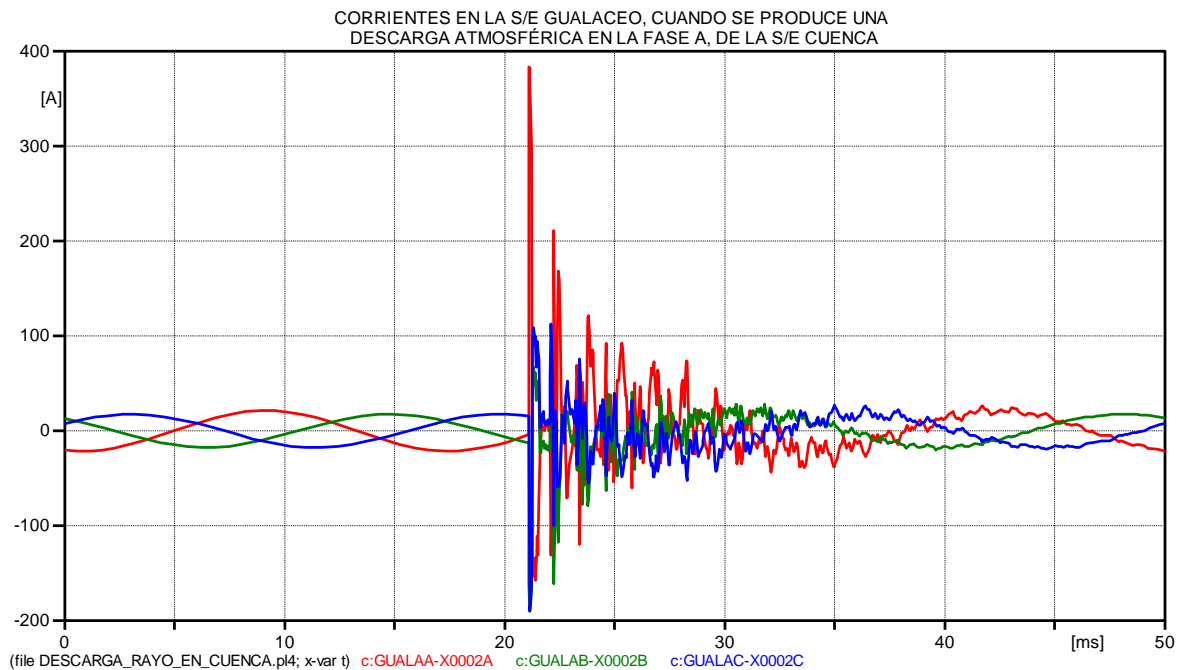


Figura 4. 110 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA
DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA

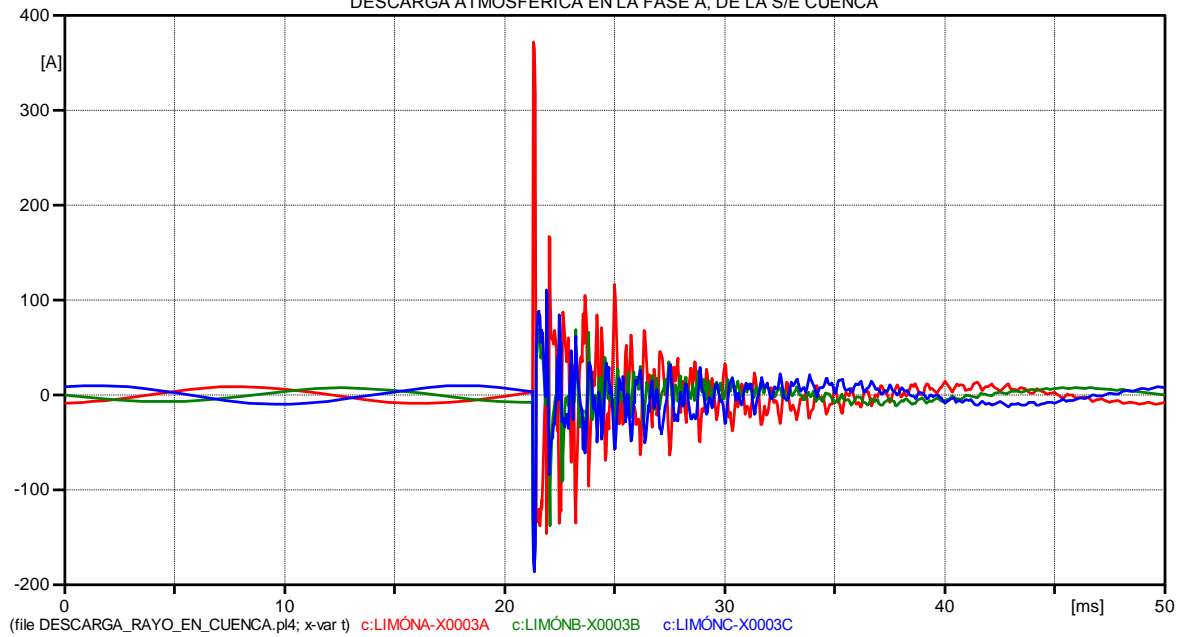


Figura 4. 111 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).

CORRIENTES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA
DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA

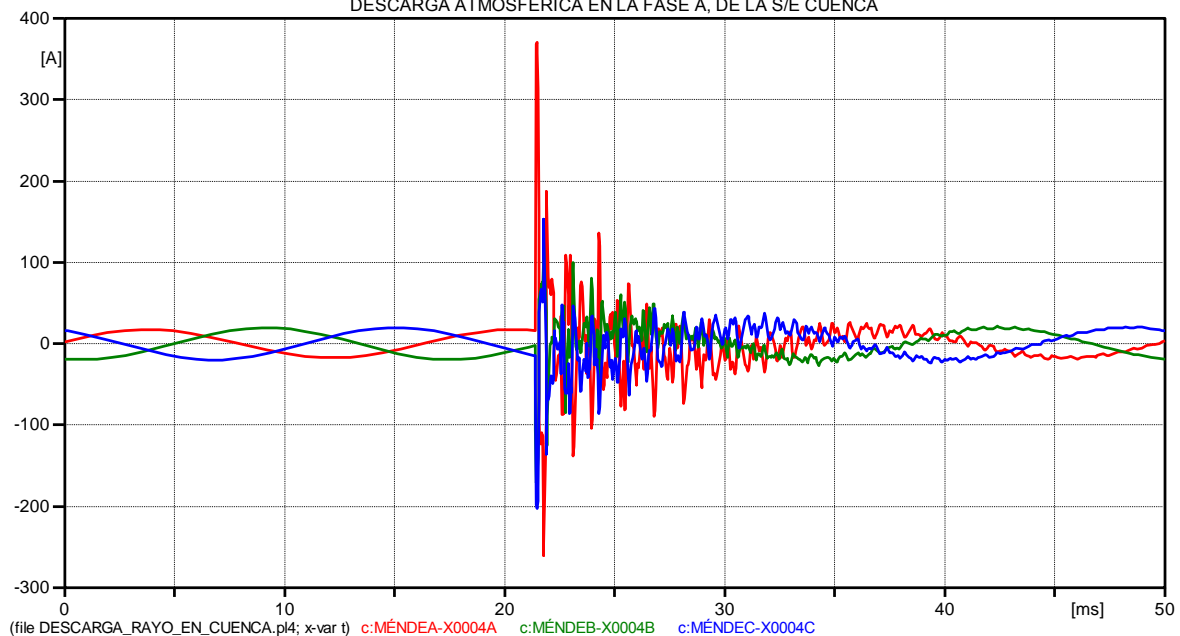


Figura 4. 112 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA
DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A DE LA S/E CUENCA

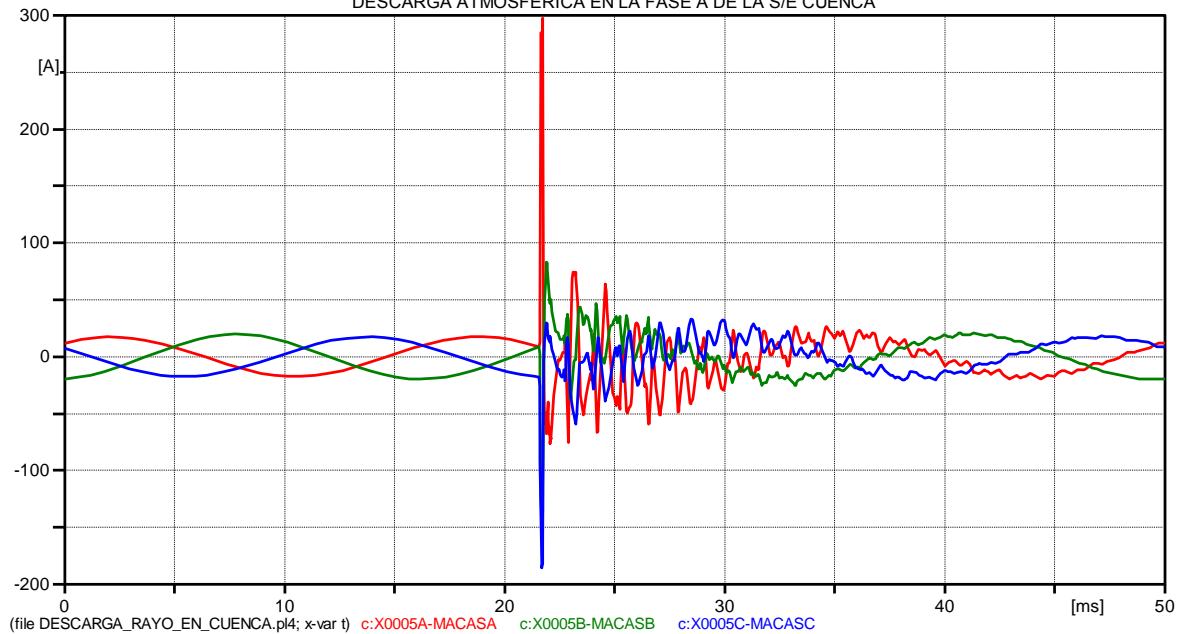


Figura 4. 113 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV).

En el siguiente cuadro se resumen los valores de sobrecorrientes obtenidas en esta simulación:

Cuadro 4. 85 Resumen de corrientes en las subestaciones, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca, a nivel de 69kV.

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E CUENCA			
	CORRIENTES EN LAS FASES EN (A)		
S/E	A	B	C
CUENCA	348,6	-205,2	235,7
GUALACEO	383,6	-190,1	-189,0
LIMON	372,1	-173,6	-186,2
MENDEZ	370,7	-171,1	-202,6
MACAS	297,7	-142,3	-185,3

Como en la simulación se utilizan pararrayos para limitar las sobretensiones en la línea, es necesario conocer cuanta energía disipa por fase cada pararrayo, en este caso la mayor disipación de energía se da en la fase A donde se produce la descarga.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

ENERGÍA DRENADA POR EL PARARRAYO DE LA S/E CUENCA , CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA

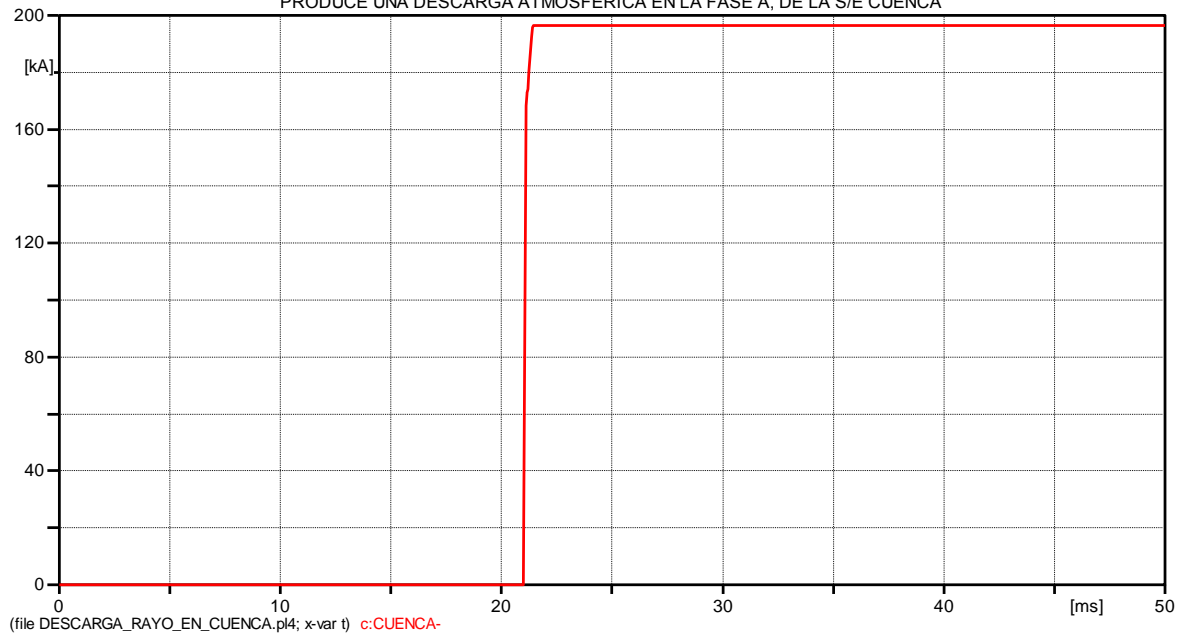


Figura 4. 114 Comportamiento de la energía disipada en la fase A de la subestación Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca (69kV)

Esta forma de onda de energía drenada a tierra por los pararrayos, es similar a las otras formas de ondas de energía drenada en cada una de las subestaciones, variando simplemente su amplitud; por lo tanto a continuación se realiza solamente un cuadro con los máximos valores de las mismas.

Cuadro 4. 86 Resumen de las energías disipadas por los pararrayos en cada una de las fases, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la subestación Cuenca, a nivel de 69kV.

ENERGÍA MÁXIMA DRENADA POR LOS PARARRAYOS CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA FASE A, DE LA S/E CUENCA - 69 kV									
CUENCA 69kV		GUALACEO		LIMÓN		MENDEZ		MACAS 69kV	
kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)	kJ	kJ/kV(Vr)
196,560	3,640	0,453	0,008	0,061	0,001	0,108	0,002	7,790	0,144

Las formas de ondas obtenidas en las simulaciones siguientes, con respecto a descargas atmosféricas en cada una de las subestaciones, tanto de tensiones, corrientes y de energía disipada, son similares a las formas de ondas mostradas anteriormente, variando simplemente su amplitud; por lo tanto en las simulaciones siguientes se omitirán los resultados de las formas de ondas; y los valores



máximos de cada una de las magnitudes obtenidas en su respectiva simulación, se resumirán en un cuadro respectivo.

4.4.2 Descarga atmosférica en la subestación Cuenca Rayoloma, a nivel de 138kV.

Para las simulaciones al nivel de 138 kV, con respecto a descargas atmosféricas, se utilizarán las demandas máximas del año 2012 en las subestaciones, y no se obtendrán resultados utilizando las demandas de años posteriores, ya que los resultados obtenidos son similares y no existe una variación considerable.

A continuación se resumen los resultados obtenidos en los siguientes cuadros:

Cuadro 4. 87 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por los pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Cuenca Rayoloma, al nivel de 138kV-2012

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E CUENCA-138kV,2012									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORDINADAS EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	2,467	-1,474	1,741	754,4	-207,8	216,5	377729,6	10,7	993,4
GUALACEO	1,819	-1,426	1,708	660,6	-218,4	210,4	4556,8	4,3	267,8
LIMON	1,634	-1,517	1,755	556,0	-205,4	197,0	122,3	22,4	964,9
MENDEZ	-1,852	-1,462	1,767	528,5	-208,2	217,2	5260,7	7,6	529,6
MACAS 138kV	-1,843	-1,536	1,555	356,6	183,9	149,2	9641,4	18,2	22,8
MACAS 69kV	-1,823	-1,531	1,550	713,8	367,2	298,2	191,4	1,5	1,6

En la subestación Cuenca Rayoloma se produce la mayor sobretensión, por lo tanto el pararrayo de esta subestación drena la mayor cantidad de energía, aproximadamente de 377,73 kJ; que equivale a 3,49 kJ/kV(Vr).

4.4.3 Descarga atmosférica en la subestación Gualaceo a nivel de 69kV

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro 4. 88 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Gualaceo, al nivel de 69kV.

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E GUALACEO									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,83	-1,26	1,61	-923,5	388,9	511,8	939,5	1,2	18,1
GUALACEO	2,48	-1,77	1,74	451,8	-266,8	-271,8	192131,9	103,6	176,9
LIMON	1,81	-1,65	1,70	413,9	-222,8	-240,5	2185,9	35,7	106,4
MENDEZ	-1,87	-1,50	1,85	408,0	-200,1	-240,3	2031,0	5,1	846,6
MACAS	-1,90	-1,74	1,80	404,6	-197,5	-227,5	13040,7	203,3	1238,4

En la subestación Gualaceo se produce la mayor sobretensión, y el pararrayo de esta subestación drena una máxima energía de 192,1kJ; el mismo que equivale a 3,55kJ/kV(Vr).

4.4.4 Descarga atmosférica en la subestación Gualaceo a nivel de 138kV

Los resultados obtenidos de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 89 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Gualaceo, al nivel de 138kV-2012

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E GUALACEO-138kV,2012									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,905	-1,343	1,756	-792,7	-217,1	210,1	14340,3	3,1	473,0
GUALACEO	2,431	-1,387	1,775	790,1	-194,3	186,8	322115,2	3,8	1946,2
LIMON	1,775	-1,520	1,666	618,4	-184,1	182,7	1685,7	23,8	204,4
MENDEZ	-1,882	-1,513	1,698	574,5	270,6	253,0	13350,8	20,1	233,5
MACAS 138kV	-1,856	-1,489	1,491	412,9	188,0	163,8	14483,0	4,7	8,3
MACAS 69kV	-1,842	-1,482	1,487	826,3	375,4	327,5	279,6	1,2	1,2

En la subestación Gualaceo se produce la mayor sobretensión y el pararrayo de esta subestación drena una energía máxima de 352,3kJ, que equivale a 2,94kJ/kV(Vr).



4.4.5 Descarga atmosférica en la subestación Limón a nivel de 69kV

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 90 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Limón, al nivel de 69kV.

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E LIMÓN 69kV									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,38	-1,15	1,33	-538,6	-165,0	316,0	1,4	1,2	1,3
GUALACEO	-1,82	-1,22	1,47	-544,6	-159,6	-123,0	1591,4	1,2	2,7
LIMON	2,48	-1,55	1,73	398,7	-118,9	-124,5	196641,8	2,7	604,5
MENDEZ	-1,92	-1,67	1,67	363,1	99,1	-94,1	12737,7	19,5	127,6
MACAS	-1,75	-1,36	1,59	450,1	-89,8	-141,4	564,2	1,3	11,5

La sobretensión más alta se produce en la subestación Limón, y el pararrayo de esta subestación drena una energía máxima de 196,6kJ, que equivale a 3,64kJ/kV(Vr).

4.4.6 Descarga atmosférica en la subestación Limón a nivel de 138kV

Los resultados obtenidos se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 91 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Limón, al nivel de 138kV-2012

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E LIMÓN-138kV,2012									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,847	-1,474	1,730	-655,2	-223,3	193,0	6323,6	9,5	513,2
GUALACEO	1,868	-1,525	1,715	-639,9	-172,7	-183,1	7521,5	36,5	384,4
LIMON	2,431	-1,628	1,761	811,5	224,8	199,7	324634,2	140,0	2124,1
MENDEZ	-1,877	-1,499	1,747	653,1	191,1	-170,6	15834,4	22,3	1920,9
MACAS 138kV	1,853	-1,421	1,708	448,1	205,6	185,7	6103,5	6,6	655,2
MACAS 69kV	1,819	-1,415	1,696	896,7	410,6	371,4	100,7	1,2	16,1



El pararrayo de la subestación Limón drena la mayor cantidad de energía, aproximadamente de 356,75kJ; que equivale a 2,97 kJ/kV(Vr).

4.4.7 Descarga atmosférica en la subestación Méndez a nivel de 69kV.

Cuadro 4. 92 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Méndez, al nivel de 69kV.

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E MÉNDEZ 69kV									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,31	-1,15	1,33	-485,2	-162,8	287,2	1,2	1,2	1,2
GUALACEO	-1,75	-1,19	1,43	-508,3	-132,4	154,7	245,4	1,2	1,8
LIMON	-1,90	-1,71	1,67	-368,2	75,5	90,5	12110,6	34,4	139,1
MENDEZ	2,48	-1,35	1,77	414,2	106,4	-152,9	196945,6	1,4	862,1
MACAS	1,81	-1,25	1,58	486,2	103,4	-118,6	1851,0	1,2	21,8

La energía más alta es drenada por el pararrayo de la subestación Méndez con un valor de 196,95kJ, que equivale a 3,64kJ/kV(Vr).

4.4.8 Descarga atmosférica en la subestación Méndez a nivel de 138kV.

Los resultados de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 93 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Méndez, al nivel de 138kV-2012

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E MÉNDEZ-138kV,2012									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,764	-1,486	1,707	-636,7	-199,4	210,1	1347,0	7,3	383,1
GUALACEO	1,866	-1,686	1,788	-574,8	208,1	221,2	12237,0	108,5	1277,4
LIMON	-1,887	-1,459	1,712	-703,1	209,8	171,5	19488,0	7,6	796,0
MENDEZ	2,463	-1,467	1,745	820,2	200,8	192,4	355987,1	10,5	2195,4
MACAS 138kV	1,884	-1,490	1,645	467,1	225,3	199,9	11652,8	9,2	297,6
MACAS 69kV	1,848	-1,484	1,639	934,5	450,1	399,8	174,8	1,3	8,2



El pararrayo de la subestación Méndez drena la mayor cantidad de energía, equivalente a 389,05kJ; que equivale a 3,24kJ/kV(Vr).

4.4.9 Descarga atmosférica en la subestación Macas a nivel de 69kv.

Los resultados obtenidos de esta simulación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 94 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Macas, al nivel de 69kV.

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E MACAS 69kV									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,86	-1,46	1,78	-722,6	290,9	454,7	1025,6	1,5	223,2
GUALACEO	-1,94	-1,65	1,81	-399,7	156,0	193,2	11681,0	13,2	888,1
LIMON	-1,82	-1,40	1,73	-394,7	164,6	188,5	897,4	1,7	194,6
MENDEZ	1,81	-1,63	1,49	-482,1	175,3	175,3	1588,3	21,4	4,6
MACAS	2,48	-1,36	1,68	-432,8	192,8	181,8	193603,1	1,5	21,0

En la subestación Macas se produce la mayor sobretensión y el pararrayo de esta subestación drena la mayor cantidad de energía igual a 193,6kJ, que equivale a 3,58kJ/kV(Vr).

4.4.10 Descarga atmosférica en la subestación Macas a nivel de 138kV.

Cuadro 4. 95 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en la fase A de la S/E Macas, al nivel de 138kV-2012

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN LA S/E MACAS69-138kV,2012									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	-1,859	-1,544	1,661	-662,8	-222,5	299,8	5663,9	11,9	92,0
GUALACEO	-1,878	-1,338	1,534	-635,8	-276,2	244,6	8798,4	2,8	12,2
LIMON	1,691	-1,389	1,726	-677,4	-194,7	220,5	196,6	3,5	449,4
MENDEZ	1,779	-1,351	1,631	-758,1	200,7	206,9	1172,0	2,8	100,6
MACAS 138kV	2,049	-1,475	1,747	-3176,6	234,6	224,5	40731,5	10,7	669,4
MACAS 69kV	2,747	-1,469	1,736	-6353,5	468,4	449,2	136763,5	1,3	16,7



El pararrayo de la subestación Macas a 69 kV, drena la máxima energía de 151,54kJ; que equivale a 2,8kJ/kV(Vr).

4.4.11 Descarga atmosférica en el cable de guarda a nivel de 69kV

Para este punto se considera en que parte del Ecuador se producen mayor cantidad de descargas atmosféricas, y según las estadísticas de la Dirección de Aviación Civil el mayor nivel isocerámico se presenta en el oriente ecuatoriano, por lo tanto la simulación se realiza, asumiendo que la descarga atmosférica en el cable de guarda, se produce entre la subestación Méndez y la subestación Macas.

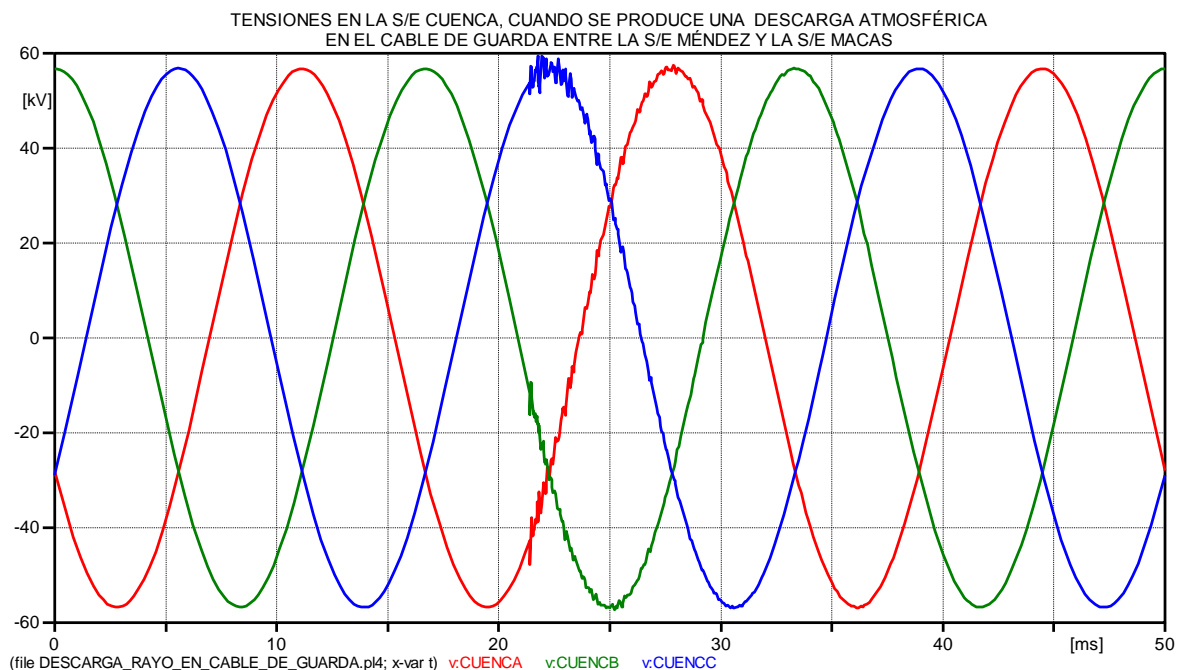


Figura 4. 115 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E GUALACEO, CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA
EN EL CABLE DE GUARDA ENTRE LA S/E MÉNDEZ Y LA S/E MACAS

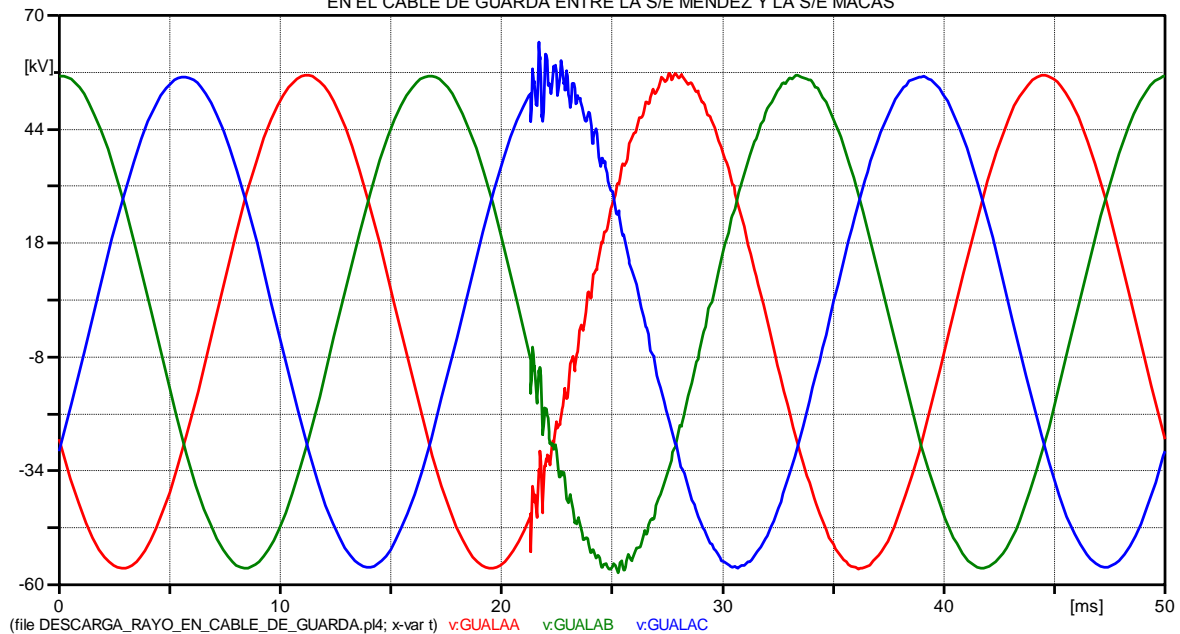


Figura 4. 116 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)

TENSIONES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA
EN EL CABLE DE GUARDA ENTRE LA S/E MÉNDEZ Y LA S/E MACAS

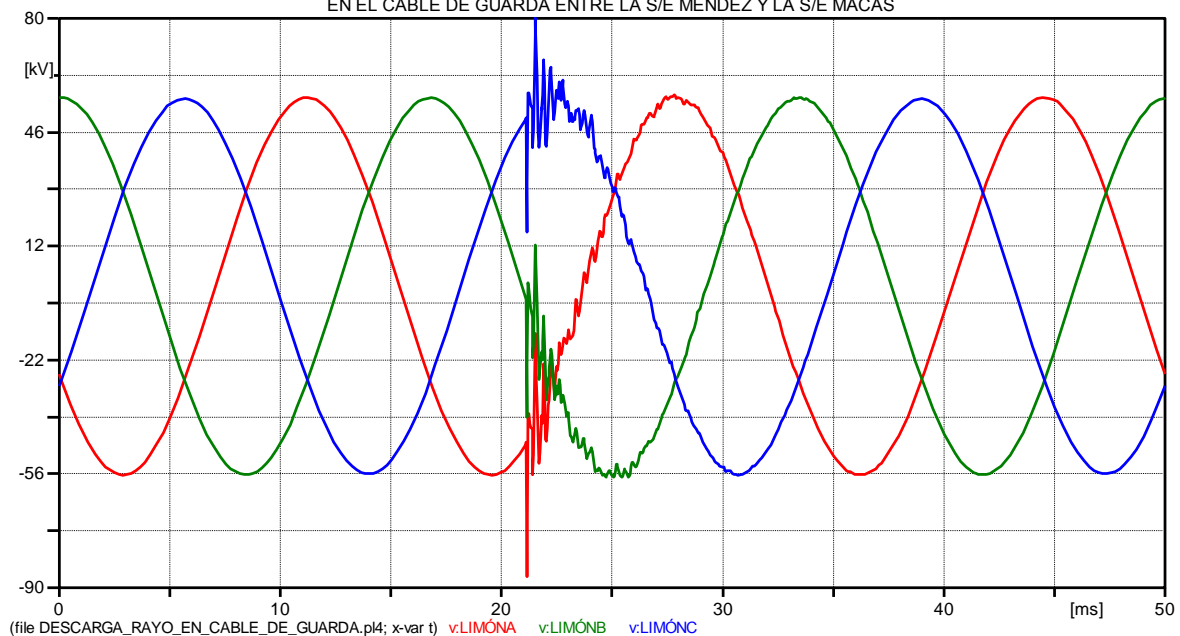


Figura 4. 117 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

TENSIONES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA
EN EL CABLE DE GUARDA ENTRE LA S/E MÉNDEZ Y LA S/E MACAS

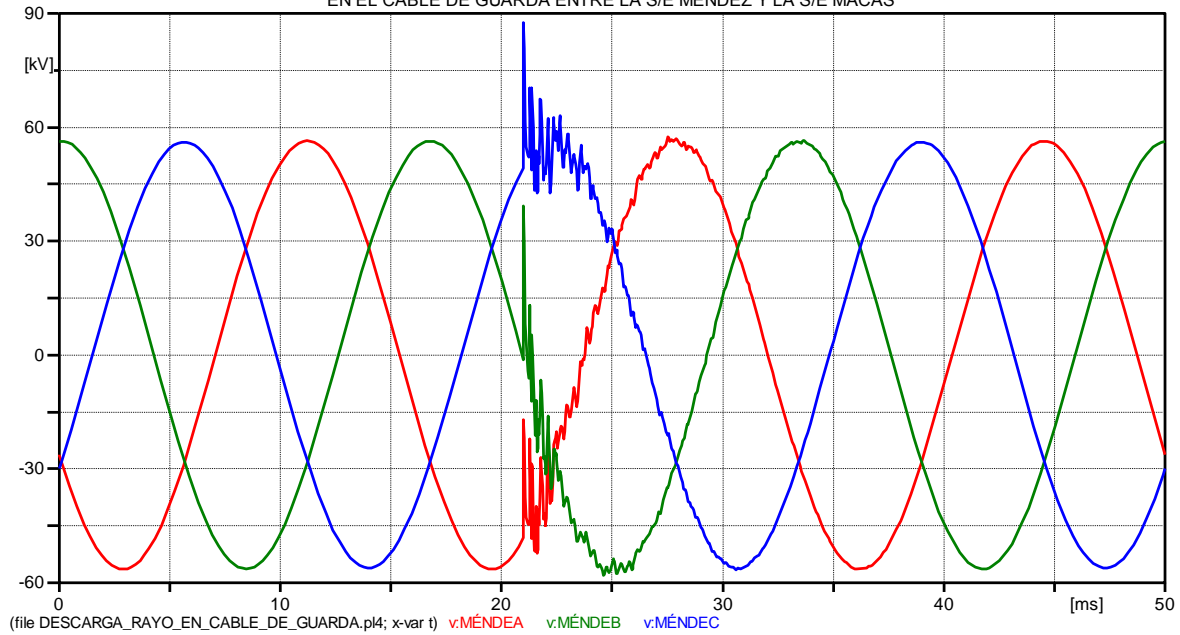


Figura 4. 118 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)

TENSIONES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA
EN EL CABLE DE GUARDA ENTRE LA S/E MÉNDEZ Y LA S/E MACAS

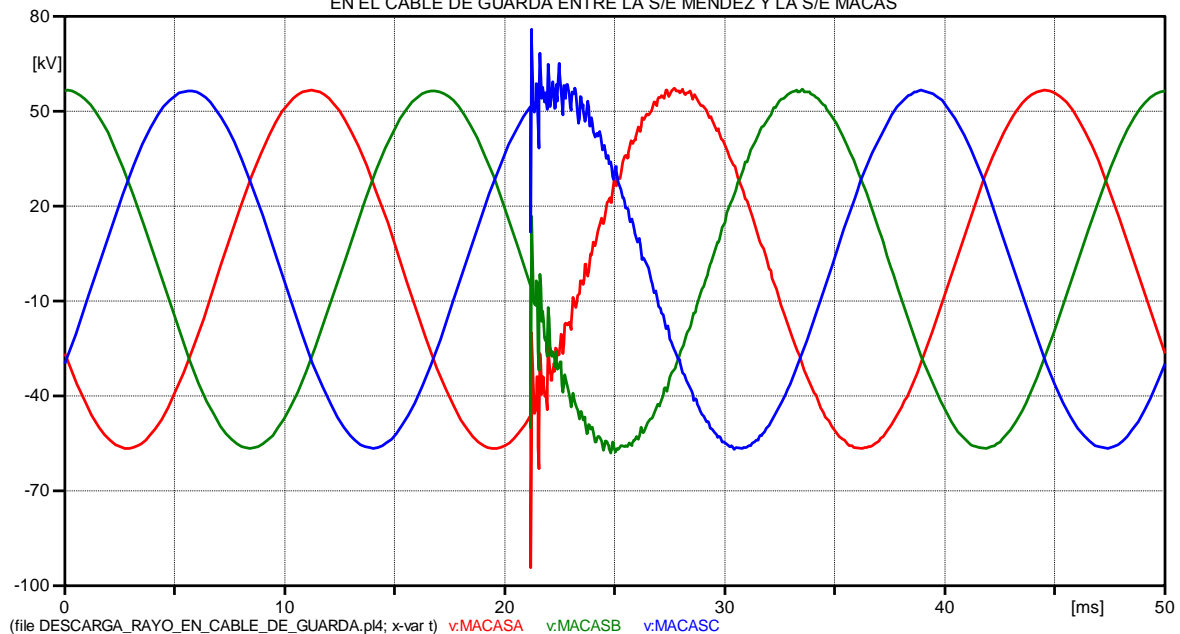


Figura 4. 119 Comportamiento de la tensión en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)



Se observa también a continuación, las formas de ondas de las corrientes de fase en cada una de las subestaciones:

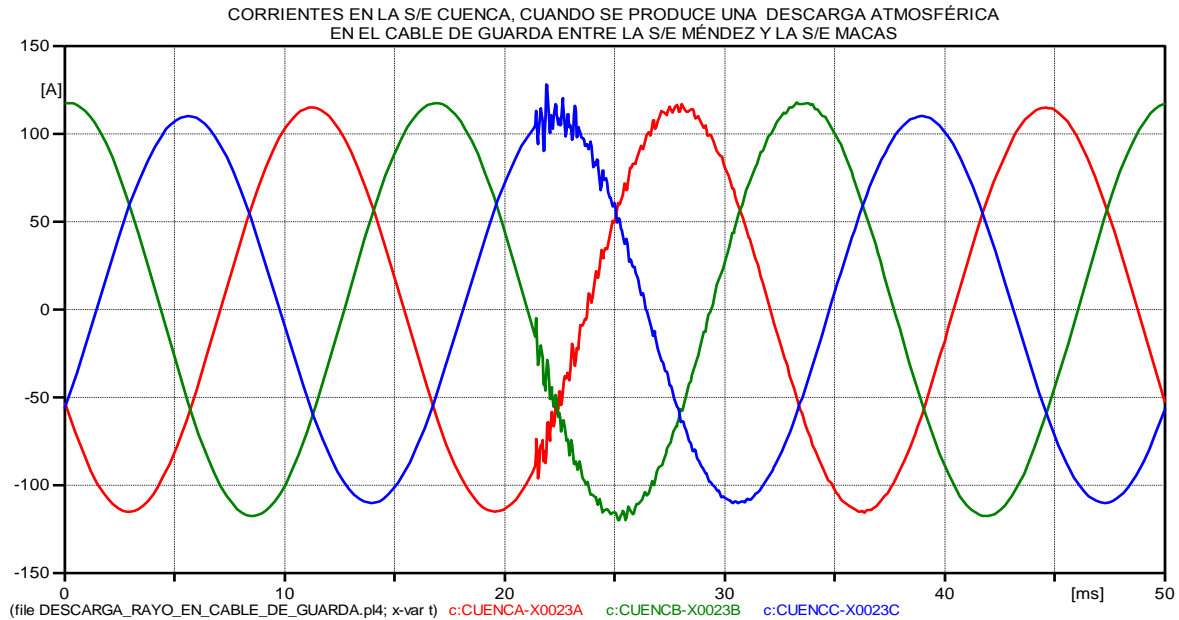


Figura 4. 120 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Cuenca, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)

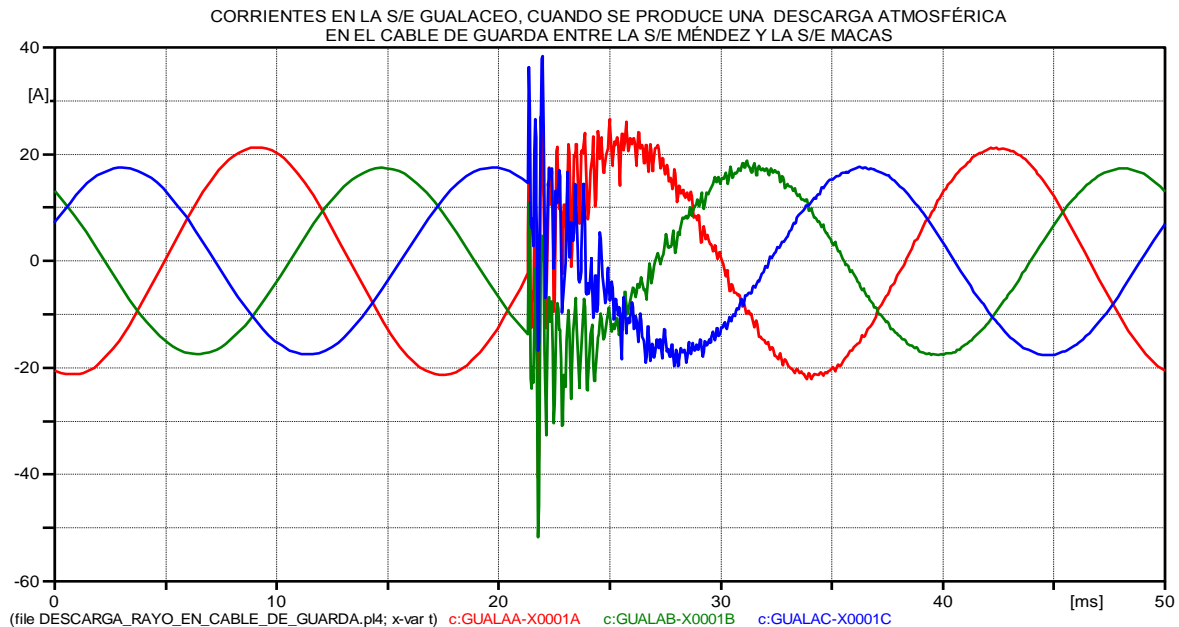


Figura 4. 121 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Gualaceo, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E LIMÓN, CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA
EN EL CABLE DE GUARDA ENTRE LA S/E MÉNDEZ Y LA S/E MACAS

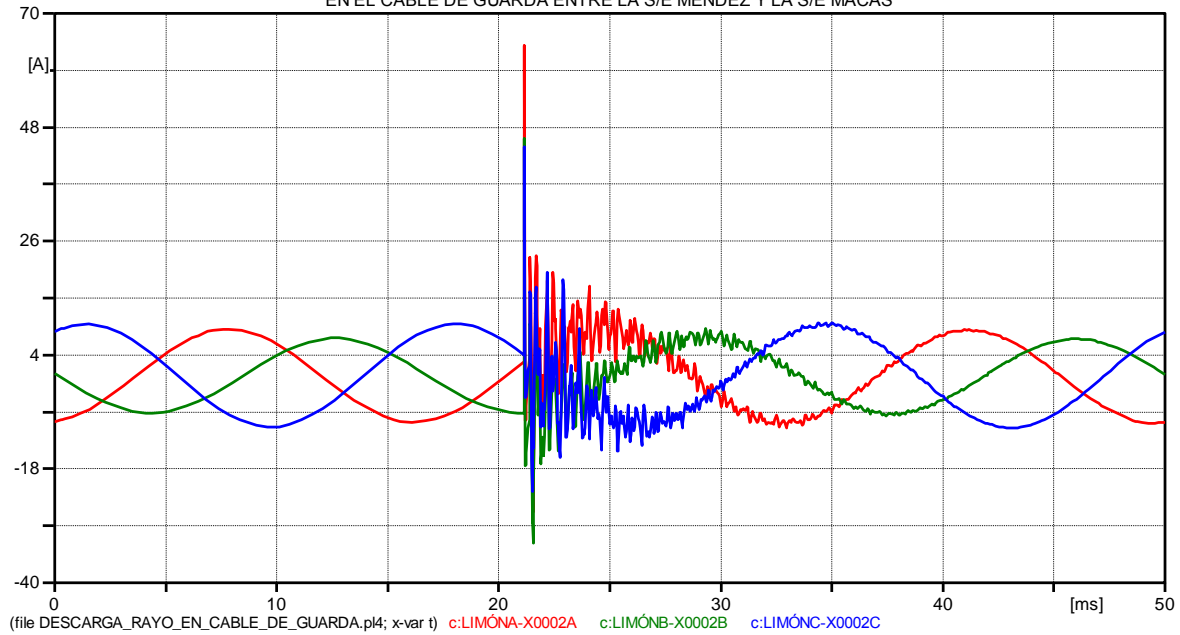


Figura 4. 122 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Limón, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)

CORRIENTES EN LA S/E MÉNDEZ, CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA
EN EL CABLE DE GUARDA ENTRE LA S/E MÉNDEZ Y LA S/E MACAS

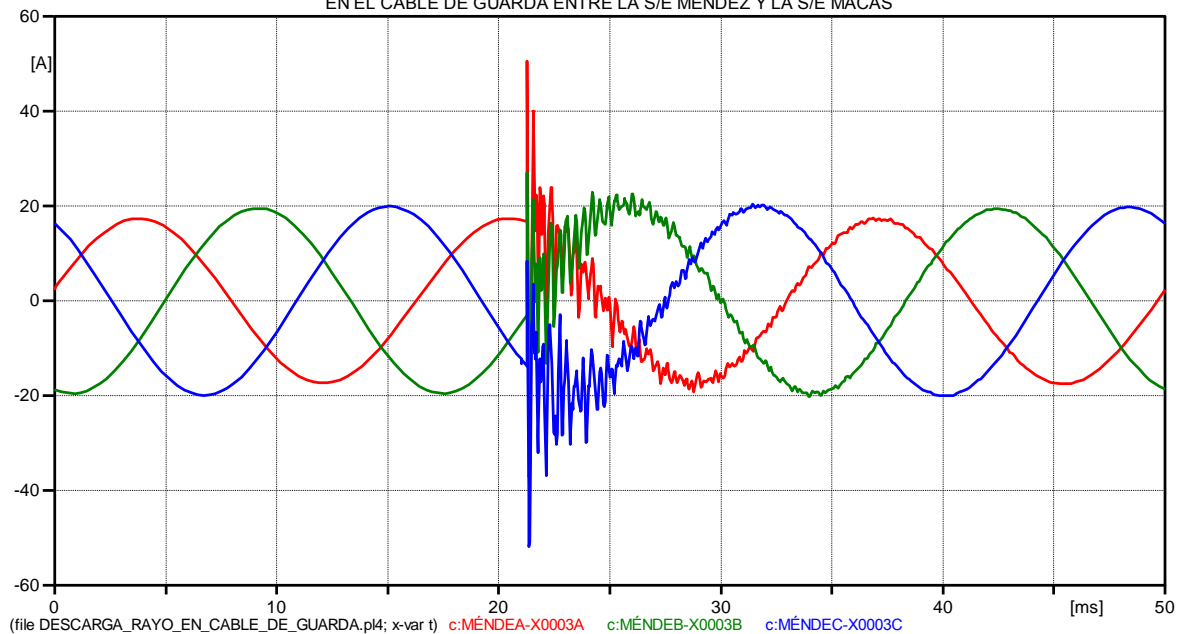


Figura 4. 123 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Méndez, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CORRIENTES EN LA S/E MACAS, CUANDO SE PRODUCE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA
EN EL CABLE DE GUARDA ENTRE LA S/E MÉNDEZ Y LA S/E MACAS

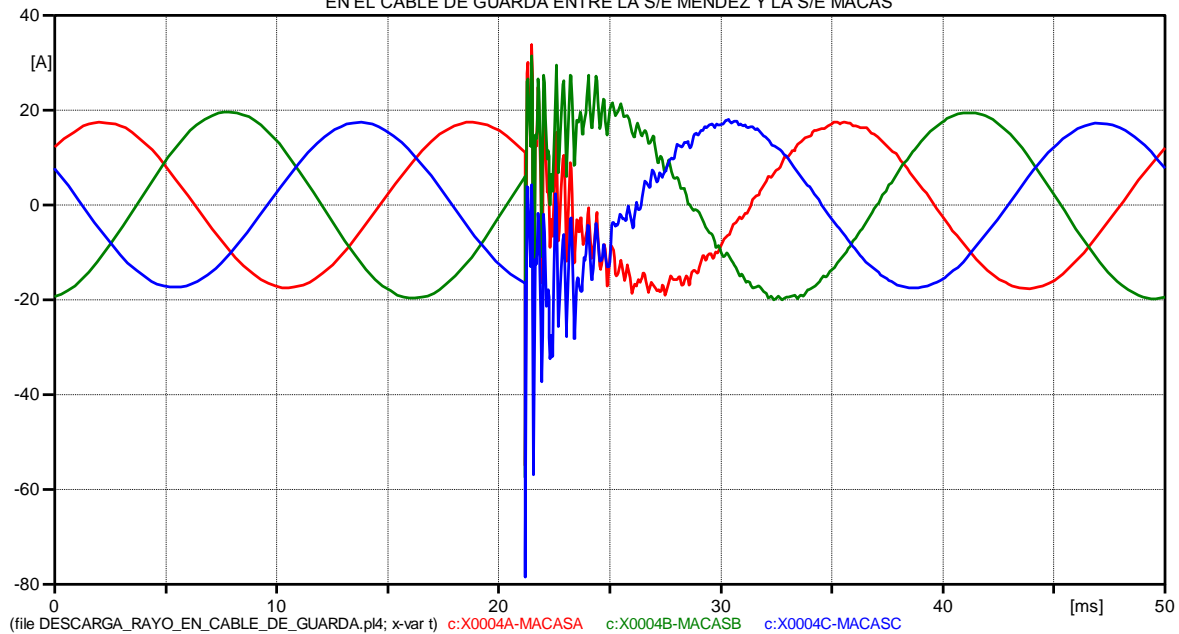


Figura 4. 124 Comportamiento de la corriente en las fases de la S/E Macas, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas (69kV)

Se observa claramente en las Figuras anteriores que las sobretensiones que aparecen en las fases, disminuyen su valor a medida que se aleja del lugar donde se produce la descarga, de esta manera se observa que en la subestación Cuenca no se produce una sobretensión de consideración, pero en las subestaciones que se encuentran cerca del lugar de la descarga atmosférica, se producen picos de sobretensión muy considerables.

Lo mismo sucede con las ondas de corriente, a excepción de la corriente en la fase C de la subestación Macas (Figura 4.124), la cual crece considerablemente antes de ser drenada a tierra por el pararrayos de esa subestación.

En el cuadro siguiente se resumen los valores de sobretensión y sobrecorriente en cada una de las subestaciones:



Cuadro 4. 96 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas, al nivel de 69kV.

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN EL CABLE DE GUARDA 69kV									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,02	-1,02	1,06	117,1	-120,1	128,2	1,20	1,20	2,20
GUALACEO	1,01	-1,02	1,13	-40,6	-51,8	38,4	1,20	1,20	1,20
LIMON	-1,54	-1,01	1,42	63,8	45,7	44,2	2,10	1,20	1,40
MENDEZ	1,02	-1,03	1,55	50,6	-37,0	-51,9	1,20	1,20	2,10
MACAS	-1,67	-1,03	1,35	103,8	92,4	-127,8	11,20	1,20	1,20

4.4.12 Descarga atmosférica en el cable de guarda a nivel de 138kV

Para esta simulación se utiliza las mismas consideraciones hechas para el nivel de 69kV.

En el cuadro siguiente se resumen los resultados:

Cuadro 4. 97 Sobretensiones, sobrecorrientes y energías drenadas por pararrayos, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda entre la subestación Méndez y la subestación Macas, al nivel de 138kV-2012.

DESCARGA ATMOSFÉRICA EN EL CABLE DE GUARDA-138kV,2012									
	TENSIÓN EN pu EN LAS FASES			COORIENTES EN LAS FASES EN (A)			ENERGIA DRENADA EN LAS FASES EN (J)		
S/E	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CUENCA	1,012	-1,020	1,129	93,7	-91,6	84,6	2,4	2,4	2,4
GUALACEO	1,010	-1,019	1,058	54,3	-61,9	-43,4	2,4	2,4	2,4
LIMON	-1,193	-1,014	1,120	66,2	-42,3	54,1	2,4	2,4	2,4
MENDEZ	-1,014	-1,028	1,232	40,6	-30,4	-22,9	2,5	2,5	2,4
MACAS 138kV	-1,433	-1,036	1,146	-33,0	28,0	-32,5	2,8	2,5	2,4
MACAS 69kV	-1,416	-1,035	1,140	-65,4	55,4	-65,2	1,1	1,1	1,1



CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Simulación de transitorios electromagnéticos por efecto Ferranti y falla fase-tierra:

De la simulación del efecto Ferranti, se observa que la tensión en la subestación Cuenca crece en un 3,5%, cuando se encuentra la línea sin carga y la generación de la central Hidroabánico; cabe recalcar que esta sobretensión va aumentando su valor desde la subestación Macas hasta llegar a la subestación Cuenca Rayoloma, donde se produce el porcentaje de crecimiento de tensión antes mencionado.

Las sobretensiones en las fases A y B (fases sin falla) cuando se produce una falla fase-tierra en la línea, depende de la relación de la reactancia de secuencia cero entre la reactancia de secuencia positiva (X_0/X_1) en el punto de falla. Desde el punto de falla, la onda viajera de tensión crece o decrece dependiendo de la impedancia de la línea que tiene que atravesar hasta llegar a un nuevo punto de medición; mientras que la onda de corriente se comporta de una manera contraria a la de tensión, ya que cuando la onda de tensión crece, la onda de corriente decrece e inversamente, según la teoría de ondas viajeras en las líneas de transmisión.

Las sobretensiones que se producen en la línea en una falla fase-tierra, considerando la mínima demanda en las subestaciones, son mayores a las sobretensiones que aparecen cuando se considera la demanda máxima en las subestaciones. De esta manera se observa en los resultados de las simulaciones, que si la sobretensión disminuye, la sobrecorriente crece e inversamente.

En la simulación de falla fase-tierra se considera dos equivalentes de Thévenin, el de la subestación Cuenca Rayoloma y el de la central Hidroabánico, por lo tanto cada equivalente tiene su respectivo aporte a la corriente de falla a tierra; siendo mayor cuando se encuentra operando Hidroabánico, y menor cuando esta central se encuentra inactiva.

Del estudio realizado podemos concluir que las sobretensiones obtenidas de las simulaciones de cortocircuitos monofásicos a tierra, es influenciada en gran



medida por las longitudes de las líneas de transmisión así como también el valor de la resistencia de falla que se presente en el momento de la misma y del período de demanda de las simulaciones.

Comparando las simulaciones de falla fase-tierra en los dos niveles de tensión (69 y 138kV), se observa que las mayores sobretensiones se dan al nivel de 138kV, y según lo mencionado anteriormente las máximas sobrecorrientes se producen al nivel de 69kV.

Simulación de transitorios electromagnéticos por maniobra:

Las sobretensiones se propagan en forma de ondas viajeras que se desplazan a través de los conductores y si existen irregularidades transversales o longitudinales ocurre un fenómeno llamado reflexión o refracción. En el caso de la energización en vacío se da que la onda reflejada es igual a la onda incidente provocando ondas de sobretensiones aproximadamente de 2.0 p.u. De las simulaciones realizadas la máxima sobretensión por la energización en vacío sin considerar los pararrayos en las subestaciones es de 2,7 pu.

La actuación de interruptores en las líneas de transmisión por maniobras de energización y la desenergización a alta velocidad, introducen esfuerzos dieléctricos produciendo envejecimientos prematuros en el aislamiento de los equipos. El análisis de sobretensiones por maniobras generalmente se realiza con el objetivo de definir las demandas dieléctricas sobre los equipos que conforman un SEP y obtener parámetros para el diseño de los mismos.

Las sobretensiones que se producen por la energización de una línea en vacío, depende de la longitud y de las características eléctricas de la línea; por lo tanto la onda viajera a través de la línea en vacío, va adquiriendo un mayor valor de tensión conforme la longitud de línea crece, obteniéndose una mayor sobretensión en el extremo de la línea que se encuentra en vacío.

De las simulaciones de desenergización de la línea en funcionamiento normal, se observa que no se producen mayores sobretensiones comparadas con las que se producen por la energización de la línea en vacío, por lo tanto la energía absorbida por los pararrayos en esta situación es pequeña; de la misma manera con respecto a las sobrecorrientes, estas son pequeñas comparadas con las que aparecen cuando se produce una falla fase-tierra en la línea de subtransmisión.



Simulación de transitorios electromagnéticos por descargas atmosféricas:

Sin considerar los pararrayos, la corriente de las descargas atmosféricas provoca sobretensiones en el orden de mega voltios, por lo que sin duda alguna dañarían los diferentes elementos del sistema. Con los pararrayos instalados en las subestaciones, se limitan estas sobretensiones al orden de los kilo voltios; de esta manera la energía absorbida por los pararrayos, es mayor que la utilizada para limitar las sobretensiones por la energización de la línea en vacío.

La descarga atmosférica que impacta directamente en una de las fases de la línea de subtransmisión, provoca sobretensiones en todas las fases, siendo de mayor valor la sobretensión en la impactada; este valor de sobretensión es menor en un punto que se encuentra a distancia considerable del lugar donde se produjo la descarga atmosférica.

En las simulaciones de sobretensiones por descargas atmosféricas tanto a 69kV como a 138kV, los pararrayos limitan las sobretensiones a un valor aproximado de 2,5 pu, drenando altas energías hacia tierra; siendo la energía más alta de 196,56kJ que equivale a una energía específica de 3,64kJ/kV(Vr) al nivel de 69kV. Esta máxima energía específica drenada por el pararrayos, no sobrepasa el valor máximo de energía del pararrayo según las características técnicas del fabricante del mismo; por lo que los pararrayos no sufrirán daños ante una descarga atmosférica, siempre y cuando la corriente de la descarga atmosférica sea alrededor de los 32kA.

Las sobretensiones que aparecen en el subsistema considerado, ante una descarga atmosférica en una de las fases, son mucho mayores a las sobretensiones que aparecen cuando se produce una descarga en el cable de guarda, ya que si la descarga cae en el hilo de guarda la corriente se drena a tierra, sin embargo; si la corriente de la descarga atmosférica es de un nivel muy elevado puede surgir la *descarga retroactiva* e irse a los conductores afectando gravemente al sistema de transmisión.

Pararrayos:

Para el cálculo de los pararrayos de las subestaciones, se consideran: la tensión más elevada del sistema en funcionamiento normal, las sobretensiones por fallas fase-tierra y las producidas por maniobras de energización de la línea; luego



considerando estos valores de tensiones se calculan la tensión de operación continua, la nominal y la energía absorbida por el pararrayo.

Los pararrayos colocados en las subestaciones limitan las sobretensiones que aparecen en la línea, de esta manera se limita la sobretensión de la energización en vacío de 2,7pu a 1,7pu considerando los pararrayos en las subestaciones; es decir se limita la sobretensión máxima, aproximadamente en un 37%.

Los pararrayos a 138kV drenan mayor cantidad de energía hacia tierra que a 69kV; siendo el mayor valor de energía drenada (2,34kJ) por el pararrayos de la subestación Macas/138kV, que corresponde a una energía específica de 0,022kJ/kV(Vr) con Vr del pararrayos de 108kV. Este valor de energía drenada por este pararrayos, no supera el valor máximo de energía que puede drenar, según sus características técnicas del fabricante; por lo tanto los pararrayos no sufrirán daños en su estructura física a causa de los transitorios electromagnéticos que se produzcan en la línea.

5.2 RECOMENDACIONES

Simulación de transitorios electromagnéticos por maniobra:

Los estudios de sobretensiones de maniobra deben ser realizados estadísticamente, de modo que todas las probables condiciones de cierre sean consideradas con respecto a la característica aleatoria de los instantes del cierre de los polos del disyuntor.

El uso de resistencias de preinserción es uno de los métodos más efectivos para controlar sobretensiones generadas en la operación de disyuntores. Estas resistencias se conectan en serie a la línea previo al cierre de los contactos principales del disyuntor para que, una vez que el disyuntor ha efectuado el cierre se forme un divisor de tensión con la resistencia preinsertada para así reducir la tensión inicial. Una vez que esto ha sucedido las resistencias se cortocircuitan para ser eliminadas del circuito. Estas operaciones si bien producen transitorios en la línea, con una selección adecuada de la resistencia y del tiempo de su permanencia pueden limitar las sobretensiones en gran medida.

El cierre controlado del disyuntor mediante el uso de dispositivos sincronizados es otra medida que junto con las resistencias de preinserción reducen la sobretensión a lo largo de toda la línea.



Considerando que las sobretensiones en la energización son función de la tensión a través de los contactos del disyuntor en el instante de cierre, se podrán disminuir si esta tensión tiende a cero. Así durante la energización esta condición se cumple cuando la tensión de alimentación pasa por cero, mientras que en un recierre, en donde existe carga atrapada, la menor tensión en los contactos del disyuntor ocurre cuando la diferencia de potencial entre la tensión de alimentación y la tensión residual es nula. En un sistema trifásico, existen dos posibilidades para el cierre de contactos de un disyuntor con el fin de conseguir estas condiciones. La primera implica cerrar las tres fases simultáneamente, cuando la tensión en una de ellas esté pasando por cero. Una segunda opción, y que brinda mejores resultados es cerrar las tres fases consecutivamente cuando la tensión en cada una de ellas pase por cero.

Para la energización de líneas de transmisión en los ramales del sistema, se debe hacer en lo posible con carga conectada al extremo lejano de la línea, esto hace que las sobretensiones disminuyan considerablemente, ya que con la impedancia de la carga, no va a haber reflexión de la onda, que es la causante de las sobretensiones.

Transformador de potencia de la subestación Macas

El transformador de potencia 138/69kV de la subestación Macas, cambia drásticamente los valores de sobretensión y de sobrecorriente del lado de alta al lado de baja del transformador, por lo que si se producen transitorios electromagnéticos en el lado de alta tensión, hay que tener mucho en cuenta la corriente en el secundario ya que se eleva según la relación de transformación, que en este caso es 2. De igual manera si se producen transitorios electromagnéticos en el lado de baja tensión del transformador, hay que tener mucho en cuenta el valor de tensión en el primario ya que prácticamente se duplicaría, afectando a todo el sistema y exigiendo a los pararrayos a absorber mayor cantidad de energía hacia tierra.

Es necesario que se fomente la investigación sobre este tipo de temas y se incremente el uso del ATP empleando modelos donde se involucre el efecto del arco de los interruptores, la acción de las protecciones, la transformada wavelet para obtener mejores cálculos en los transitorios, entre otros. Ya que es de gran importancia para que el sistema sea diseñado adecuadamente y garantice confiabilidad y eficiencia en su operación.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ORILLE F. Ángel Luis, Centrales Eléctricas III, Barcelona, Edición Universidad Politécnica de Cataluña, Primera Edición, 1993.
- [2] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60071-1, Insulation Co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules. Seventh Edition, 1993-12.
- [3] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60071-2, Insulation Co-ordination – Part 2: Application Guide. Third Edition, 1996 – 12.
- [4] D’AJUZ Ary, FONSECA S. Cláudio, CARVALHO S., FILHO Jorge, DIAS Nora, PEREIRA Marco, ESMERALDO Paulo, VAISMAN Roberto, FRONTIN Sérgio, Transitorios Eléctricos e Coordenação de Isolamento – 181 Aplicação em Sistemas Eléctricos de Alta Tensão – FURNAS / UFF, Centrais Eléctricas S.A., Brasil, 1987
- [5] D’AJUZ, Ary. Transitorios eléctricos e coordenação de isolamento-aplicação em sistemas de potencia de alta tensão. Rio de Janeiro. FURNAS. Niterói, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF, 1987.
- [6] AYORA Paúl, Folleto de Diseño en Alto Tensión, EPN.
- [7] ATPDRAW, Users’ Manual, version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP, Hans Kr. Høidalen, october 2002
- [8] MARTINEZ J., “El paquete de simulación ATP”, Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- [9] RESTREPO L., DELGADO G., CASTRO F., “Modelos de líneas de transmisión para transitorios electromagnéticos en Sistemas de Potencia”, Universidad del Valle, Colombia, 2008.
- [10] DURBAK D., GOLE A., MARZ M., NATARAJAN R., “Modeling Guidelines for Switching Transients”, IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

[11] RAMIREZ Díaz Jorge, MARTINEZ Lozada Miguel, Influencia de las sobretensiones por descargas atmosféricas y comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en líneas aéreas de transmisión y distribución, Grupo de investigación en Alta Tensión, Universidad Simón Bolívar.

[12] Alternative Transient Program Rule Book, K.U. Leuven EMTP Center.

[13] GREENWOOD Allan, Electrical Transients in Power Systems second edition, México: Editorial John Wiley & Sons, Inc.

[14] ABB. "ABB HS PEXLIM – Surge Arresters (Productos de Alta Tensión)".

[15] ABB, TOV capability and protective characteristics for surge arresters type EXLIM and PEXLIM y TRIDELTA, Technical information, Edition 2, 2004 – 11 [17], Section EXLIM T.

[16] TESIS ANDRÉS MAURICIO GUERRERO PAREDES "ANÁLISIS DE LA INTERCONEXIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ABANICO AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO" 2010.



ANEXO A: ESPECIFICACIÓN Y CÁLCULO DE PARARRAYOS, A NIVEL DE TENSIÓN DE 138kV Y 69kV

A.1 TENSIONES Y SOBRETENSIONES A NIVEL DE 138kV

Para el estudio realizado, en vista de no disponer datos de los descargadores de sobretensiones que se encuentran instalados en las subestaciones; se procede a realizar el cálculo de estos pararrayos, según el procedimiento descrito a continuación.

De las simulaciones realizadas se pueden resumir las tensiones máximas del subsistema en estudio, en los siguientes cuadros:

Cuadro A. 1 Datos generales del sistema en estudio

Parámetro	Valor
Tensión nominal (kV,rms,fase-fase)	138
Frecuencia nominal (Hz)	60
Número de fases	3
Neutro del sistema	sólidamente conectado a tierra
Tensión base(kV,pico,fase-tierra de Tn)	112,68
Tensión más elevada del sistema Vs(kV)	140,76

Cuadro A. 2 Magnitudes de las sobretensiones a considerarse en el procedimiento

Tipo de Sobretensión	Valor (pu)	Valor (kV-pico f-t)
Sobretensión temporal	1,34	150,99
Sobretensión de frente lento (Ve)	2,72	306,48

A.2 SELECCIÓN DE PARARRAYOS

A.2.1 Tensión de operación continua del pararrayos (Vc).

Al ser un sistema con neutro sólidamente conectado a tierra, y considerando un factor de seguridad de 1.05, el voltaje de operación continua de los pararrayos para la protección de las subestaciones se calcula tal como se muestra a continuación:

$$V_c \geq 1,05 * V_s / \sqrt{3}$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$V_c \geq 1,05 * 140,76/\sqrt{3}$$

$$V_c \geq 85,33KV_{rms}$$

A.2.2 Tensión asignada o nominal (Vr)

La metodología que se utilizará para determinar la tensión nominal del pararrayos será la propuesta por el fabricante (TRIDELTA).

A continuación se muestran los cálculos necesarios para la determinación de la tensión nominal Vr.

Cálculo de la tensión nominal mínima Vr,min:

$$V_{r,min} \geq 1,25 * V_c$$

$$V_{r,min} \geq 1,25 * 85,33$$

$$V_{r,min} \geq 106,66KV_{rmsf-t}$$

Tensión nominal en función de la sobretensión.

$$V_r' = \frac{TOV}{k_{TOV}}$$

De donde, el valor de TOV corresponde a la máxima sobretensión temporal de las simulaciones realizadas en el subsistema en estudio, esto es, 1.34 p.u y el factor kTOV se determina en base a la curva característica tensión a.c. vs tiempo de las características técnicas del pararrayo TRIDELTA (Anexo B), para lo cual se asume que la duración de la sobretensión sea de 100 (s), lo cual implica una condición extrema ya que la duración de una sobretensión temporal de esta magnitud está en el orden 10 s. Se tiene entonces:

$$TOV = 1,34pu$$

$$k_{TOV} = 1$$

$$V_r' = \frac{1,34pu}{1}$$

$$V_r' = 1,34 * \frac{112,68}{\sqrt{2}}$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$V_r' = 106,76 kV_{rms_{f-t}}$$

Por último, la tensión nominal del pararrayos será la mayor entre $V_{r,min}$ y V_r' , así

$$V_r \geq \max(V_{r,min}, V_r')$$

$$V_{r,min} \geq 106,76 kV_{rms_{f-t}}$$

A.2.3 Corriente nominal de descarga (In).

Según las características técnicas del pararrayo TRIDELTA, la corriente nominal de descarga es de 10kA.

A.2.4 Capacidad de absorción de energía

Del Anexo B de las características técnicas del pararrayo TRIDELTA tomamos los valores:

$$V_r = 108 kV$$

$$V_{ps} = 207 kV$$

La energía se calcula con la siguiente expresión:

$$W = 2V_{ps}(V_e - V_{ps}) * \frac{T_w}{Z}$$

Donde $V_e=306,48kV$, es el valor máximo de las simulaciones de energización en vacío de la línea en estudio.

$$T_w = \frac{L}{v}$$

Como en cada subestación se consideró que existen pararrayos instalados, por lo tanto L es la longitud de la línea desde la subestación Cuenca hasta la subestación Gualaceo, ya que la máxima sobretensión de maniobra se produjo en la subestación Cuenca esto es, $L=20,8$ km y v es la velocidad de propagación de la onda y se considera igual a $0,3km/us$.

Por lo tanto:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$T_w = \frac{20,8km}{0,3km/us}$$

$$T_w = 69,33us = 0,0693ms$$

La inductancia y capacitancia de esta línea se calculan a partir de sus valores de reactancia y susceptancia

$$X_L = 11,5\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

$$L = \frac{11,5}{2\pi * 60} = 0,0305H$$

$$B_c = 64,52 uS$$

$$C = \frac{B_c}{2\pi f}$$

$$C = \frac{64,52 * 10^{-6}}{2\pi * 60} = 0,17 uF$$

Por lo que la impedancia característica de la línea es:

$$Z = \sqrt{\frac{0,0305}{0,17 * 10^{-6}}} = 423,57 \Omega$$

Por lo tanto la energía máxima a ser absorbida por el pararrayo ante un evento de energización es:

$$W = 2 * 207 * (306,48 - 207) * \frac{0,0693}{423,57}$$

$$W = 6,73kJ$$

Finalmente la energía específica para el pararrayos de la subestación Cuenca a 138kv es:

$$W' = \frac{W}{V_r} \left[\frac{kJ}{kV(V_r)} \right]$$



$$W' = \frac{6,73}{108} \left[\frac{kJ}{kV(V_r)} \right]$$

$$W' = 0,062 \frac{kJ}{kV(V_r)}$$

Este valor está muy por debajo del valor de absorción de energía según CEI 60099-4, según se observa en las características técnicas del pararrayos TRIDELTA en el Anexo B.

Las características del pararrayo para el nivel de tensión de 138kV se pueden resumir en el siguiente cuadro:

Cuadro A. 3 Características del pararrayos a nivel de 138kV

Vc (kV)	Vr (kV)	T residual(kV) ante un impulso tipo rayo 10kA (8/20)	Vref. (kV)
86	108	259	212,3

Donde Vref es el valor de tensión de referencia, que se ingresa en el cuadro de diálogo en ATPDraw, y es igual a

$$V_{ref} = 1.39 * \sqrt{2} * V_r \text{ del pararrayo}$$

De la misma manera descrita anteriormente se calcula las especificaciones del pararrayos a nivel de 69kV.

Estos resultados se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro A. 4 Características del pararrayos a nivel de 69kV

Vc (kV)	Vr (kV)	T residual(kV) ante un impulso tipo rayo 10kA (8/20)	Tref. (kV)
48	60	144	117,94

La tensión residual para un impulso tipo rayo de 10kA (8/20) sirve para calcular la característica tensión- corriente del pararrayo.

A.2.5 Cálculo de tensión vs corriente de pararrayos.

Los descargadores de sobretensiones que serán utilizados en el presente estudio son de óxido de zinc los mismos que tienen la siguiente característica de corriente y tensión según la figura B.2 del Anexo B.



De esta gráfica se observa lo siguiente:

Cuadro A. 5 Corriente vs porcentaje de Tensión residual para un impulso tipo rayo de 10kA (8/20)

CORRIENTE (A)	V% DE TEN. RESIDUAL
100	78,0%
200	80,0%
470	82,0%
750	84,0%
1500	86,0%
2000	88,0%
2800	90,0%

Con la ayuda de este cuadro, se calcula la característica tensión – corriente de los pararrayos tanto a 138kV como a 69kV

Para el pararrayo a nivel de 69kV se tiene la siguiente característica tensión-corriente, sabiendo que la tensión residual es 144kV.

Cuadro A. 6 Característica de corriente vs tensión del pararrayos a 69kv

CORRIENTE (A)	TENSIÓN (V)
100	112320
200	115200
470	118080
750	120960
1500	123840
2000	126720
2800	129600

Del mismo modo se obtiene la característica tensión-corriente, para los pararrayos a nivel de 138kV, sabiendo que la tensión residual para un impulso tipo rayo de 10kA (8/20) es de 259 kV.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cuadro A. 7 Característica de corriente vs tensión del pararrayos a 138kV

CORRIENTE (A)	TENSIÓN (V)
100	202020
200	207200
470	212380
750	217560
1500	222740
2000	227920
2800	233100



ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DEL PARARRAYOS A SER UTILIZADO

CATALOGO DEL PARARRAYOS TRIDELTA

Pararrayo de óxido de zinc, para alta tensión.

Cuadro B. 1 Condiciones normales de operación

Temperatura ambiente:	-60°C ... +55°C
Frecuencia de la red:	48 Hz ... 62 Hz

Cuadro B. 2 Datos técnicos

Tensión asignada U_r :	6 kV ... 240 kV	Clase de descarga de línea:	3
Corriente nominal de descarga :	10 kA	Corriente de cortocircuito asignada:	40 ... 50 kA
Impulso de corriente de alta amplitud (4/10) :	100 kA	Capacidad de absorción de energía según CEI 60099-4:	6,7 kJ / kV $_{Ur}$
Impulso de corriente de larga duración	1000 A / 2000 μ s	con doble impulso de 3000 μ s:	12 kJ / kV $_{Ur}$

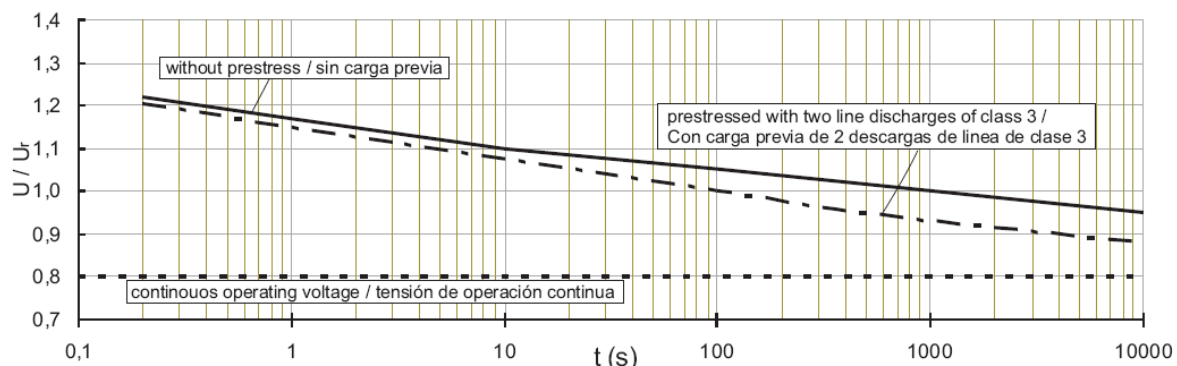


Figura B. 1 Curva característica tensión a.c. – tiempo (TOV)



Cuadro B. 3 Características de protección del pararrayos

type / Tipo	rated voltage / Tensión asignada	continuous operating voltage / Tensión de operación continua	temporary overvoltage Sobrestensión temporal TOV ¹⁾		residual voltage at sleep and lightning impulse current / Tensión residual con impulso de corriente de frente escarpado y tipo rayo					residual voltage at switching impulse current / Tensión residual con impulso de maniobra				min. housing size / Tamaño mínimo de la envolvente
			U _{10s}	U _{10s}	10 kA (1/2)	5 kA (8/20)	10 kA (8/20)	20 kA (8/20)	40 kA (8/20)	250 A (30/70)	500 A (30/70)	1000 A (30/70)	2000 A (30/70)	
	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	
SB 6/10.3-0	6	4,8	6,9	6,5	16,6	14,4	15,2	16,6	17,6	12,2	12,5	12,9	13,3	1
SB 9/10.3-0	9	7,2	10,4	9,7	24,9	21,7	22,8	24,9	26,4	18,2	18,8	19,4	20,0	1
SB 12/10.3-0	12	9,6	13,8	13,0	33,1	28,9	30,4	33,1	35,3	24,3	25,1	25,8	26,7	1
SB 18/10.3-0	18	14,4	20,7	19,4	49,6	43,2	45,5	49,6	52,8	36,4	37,5	38,7	39,9	1
SB 21/10.3-0	21	16,8	24,2	22,7	57,9	50,4	53,1	57,9	61,6	42,5	43,8	45,1	46,6	2
SB 27/10.3-0	27	21,6	31,1	29,2	74,4	64,9	68,3	74,4	79,2	54,6	56,3	58,1	59,9	2
SB 30/10.3-0	30	24,0	34,5	32,4	78,5	68,4	72,0	78,5	83,5	57,6	59,4	61,2	63,1	2
SB 33/10.3-0	33	26,4	38,0	35,6	86,3	75,2	79,2	86,3	91,9	63,4	65,3	67,3	69,5	2
SB 36/10.3-0	36	28,8	41,4	38,9	94,2	82,1	86,4	94,2	100,2	69,1	71,2	73,4	75,8	2
SB 42/10.3-0	42	33,6	48,3	45,4	109,9	95,8	100,8	109,9	116,9	80,6	83,1	85,7	88,4	3
SB 48/10.3-0	48	38,4	55,2	51,8	125,6	109,4	115,2	125,6	133,6	92,2	95,0	97,9	101,0	3
SB 51/10.3-0	51	41	59	55	133	116	122	133	142	98	101	104	107	4
SB 54/10.3-0	54	43	62	58	142	124	130	142	151	104	107	111	114	4
SB 60/10.3-0	60	48	69	65	157	137	144	157	167	115	119	122	126	4
SB 63/10.3-0	63	50	72	68	165	143	151	165	175	121	124	128	132	4
SB 66/10.3-0	66	53	76	71	172	150	158	172	183	126	130	134	139	4
SB 72/10.3-0	72	58	83	78	189	164	173	189	201	138	143	147	152	4
SB 75/10.3-0	75	60	86	81	196	171	180	196	209	144	148	153	158	5
SB 84/10.3-0	84	67	97	91	220	192	202	220	234	162	167	172	177	5
SB 90/10.3-0	90	72	104	97	235	205	216	235	251	173	178	184	189	5
SB 96/10.3-0	96	77	110	104	251	219	230	251	267	184	190	196	202	5
SB 99/10.3-0	99	79	114	107	259	226	238	259	276	190	196	202	209	6
SB 102/10.3-0	102	82	117	110	267	233	245	267	284	196	202	208	215	6
SB 108/10.3-0	108	86	124	117	282	246	259	282	300	207	214	220	227	6
SB 120/10.3-0	120	96	138	130	314	274	288	314	334	230	237	245	253	6
SB 123/10.3-0	123	98	141	133	322	280	295	322	342	236	243	251	259	7
SB 132/10.3-0	132	106	152	143	346	301	317	346	368	254	261	269	278	7
SB 138/10.3-0	138	110	159	149	361	314	331	361	384	265	273	281	290	7
SB 144/10.3-0	144	115	166	156	377	329	346	377	401	277	285	294	303	7
SB 150/10.3-0	150	123	173	162	400	349	367	400	426	294	303	312	322	7
SB 168/10.3-0	168	134	193	181	439	383	403	439	467	322	332	343	353	2x5
SB 186/10.3-0	186	149	214	201	486	424	446	486	517	357	368	379	391	2x6
SB 192/10.3-0	192	154	221	207	502	438	461	502	535	369	380	392	404	2x6
SB 198/10.3-0	198	158	228	214	518	451	475	518	551	380	392	404	417	2x6
SB 210/10.3-0	210	168	242	227	549	479	504	549	585	403	416	428	442	2x6
SB 214/10.3-0	214	171	246	231	560	488	514	560	596	411	424	437	451	2x6
SB 228/10.3-0	228	182	262	246	596	520	547	596	635	438	451	465	480	2x6
SB 240/10.3-0	240	192	276	259	628	547	576	628	668	461	475	490	505	2x6



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Protective characteristics

Max residual voltage in percent of residual voltage at 10 kA 8/20 impulse

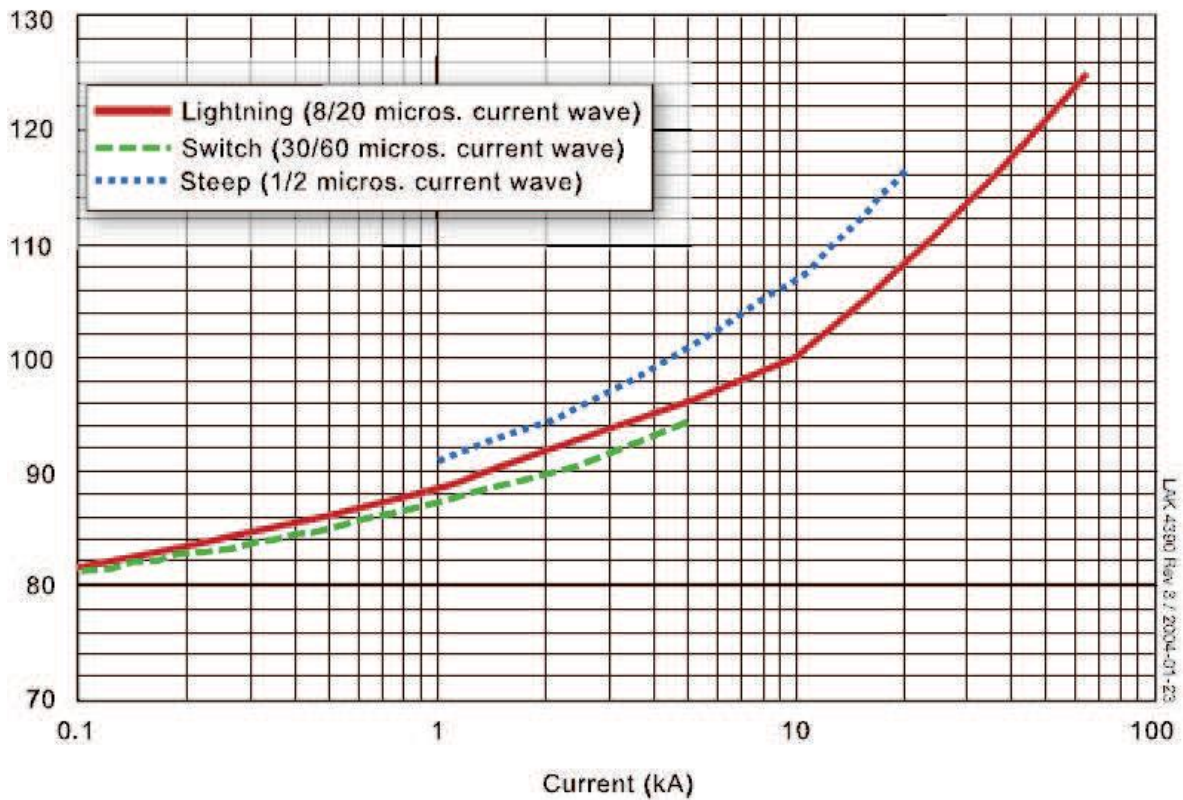


Figura B. 2 Características de operación del pararrayos

Fuente: ABB, TOV capability and protective characteristics for surge arresters type EXLIM and PEXLIM y TRIDELTA, Technical information, Edition 2, 2004 – 11, Section EXLIM T,[15].



ANEXO C: ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Cuando se energiza una línea de transmisión, el voltaje, la corriente, la potencia y la energía fluyen desde la fuente hacia la carga localizada a una distancia determinada, propagándose como ondas electromagnéticas con una velocidad finita, lo cual, permite que a un tiempo corto la carga reciba dicha potencia. Esto da lugar al concepto de ondas viajeras en una línea de transmisión con parámetros distribuidos. Cuando una línea de transmisión con parámetros distribuidos es sometida a una perturbación, como una descarga atmosférica o una operación de maniobra, surgen ondas de voltaje y corriente que viajan a lo largo de la línea de transmisión a una velocidad cercana a la velocidad de la luz, cuando estas ondas llegan a los terminales de la línea, dan lugar a la aparición de ondas reflejadas de voltaje y corriente que viajan de regreso por la línea de transmisión sobrepuestas a las ondas iniciales y que debido a las pérdidas en la línea, las ondas que viajan son atenuadas y desaparecen después de algunas reflexiones.

C.1 Ecuaciones de ondas de Tensión y Corriente

Del análisis matemático correspondiente se ha visto que las expresiones para las ondas de tensión y corriente en una línea de transmisión tienen la forma general siguiente:

$$V(x, t) = \left(e(0, t) - \frac{x}{u} \right)$$

$$I(x, t) = \left(e(0, t) - \frac{x}{u} \right) * \frac{1}{Z_0}$$

Donde:

$e(0, t)$ = es la tensión aplicada en una línea de transmisión en el extremo del emisor.

$u = \frac{1}{\sqrt{L * C}}$ = Velocidad de desplazamiento de la onda

x = distancia de la posición de la señal en el conductor



$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{Impedancia característica de la línea de transmisión}$$

Como se sabe L y C son la inductancia y la capacitancia de la línea de transmisión las mismas que dependen de la configuración geométrica.

C.2 Reflexión y refracción de ondas viajeras

En una línea de transmisión ordinaria la potencia puede propagarse en ambas direcciones, es decir la línea de transmisión es bidireccional.

Las ondas incidentes, reflejadas y refractadas se producen cuando se encuentran discontinuidades, es decir diferentes impedancias en un mismo trayecto, esto ocurre debido a que las líneas de transmisión llegan a las subestaciones en las cuales se conecta equipos que tienen su propia impedancia característica distinta al de la línea de transmisión.

Considerando la posibilidad de la unión entre las líneas de transmisión de impedancia característica Z_1 y Z_2 , y bajo la consideración de que $Z_1 > Z_2$, cuya consideración podría ser la unión entre una línea aérea y un cable, lo cual se muestra en el siguiente gráfico:

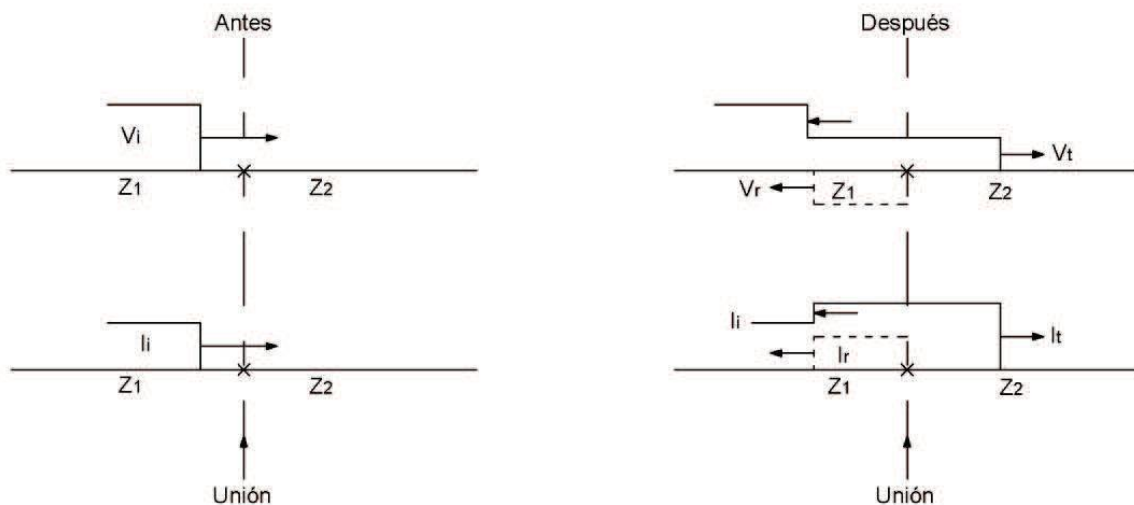


Figura C. 1 Ondas de tensión y corriente incidentes, reflejadas y transmitidas en líneas de impedancia Z_1 y Z_2 .

Fuente: GREENWOOD Allan, Electrical Transient in Power Systems second edition, Mexico [13], Pág. 245.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

La onda incidente (i) y la reflejada (r), se comportan como se indican en el gráfico y se relacionan con las impedancias características de las dos líneas (Z_1 y Z_2) de la siguiente forma:

$$\frac{V_i}{I_i} = Z_1$$

$$\frac{V_r}{I_r} = -Z_1$$

$$\frac{V_t}{I_t} = Z_2$$

La tensión que se transmite (V_t), a la segunda línea en cualquier instante será la suma algebraica de los voltajes incidente y reflejado en la primera línea.

$$V_t = V_i + V_r$$

De la misma manera la corriente transmitida será:

$$I_t = I_i + I_r$$

Realizando el desarrollo de las ecuaciones anteriores, tenemos:

$$I_t * Z_2 = Z_1 * I_i - Z_1 * I_r$$

Cuyas ecuaciones finales son:

Corriente transmitida

$$I_t = \frac{2}{Z_1 + Z_2} V_i$$

Corriente reflejada

$$I_r = \frac{V_i}{Z_1} * \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Tensión reflejada

$$V_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} V_i$$



Tensión transmitida

$$V_r = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} V_i$$

La reflexión implica un cambio de signo ya sea de voltaje o de corriente, pero no de las dos simultáneamente. Las ecuaciones de tensión reflejada y tensión transmitida pueden resumirse como:

$$V_r = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} V_i = \alpha * V_i$$

$$V_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} V_i = \beta * V_i$$

En donde;

$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$; denominado coeficiente de transmisión; sus valores pueden variar entre $0 \leq \alpha \leq 2$, dependiendo de los valores relativos de Z_1 y Z_2 .

$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$; denominado coeficiente de reflexión; sus valores pueden ser positivos o negativos dependiendo de los valores relativos de Z_1 y Z_2 , $-1 \leq \beta \leq 1$

En la figura siguiente se presenta varias opciones de la onda de tensión.

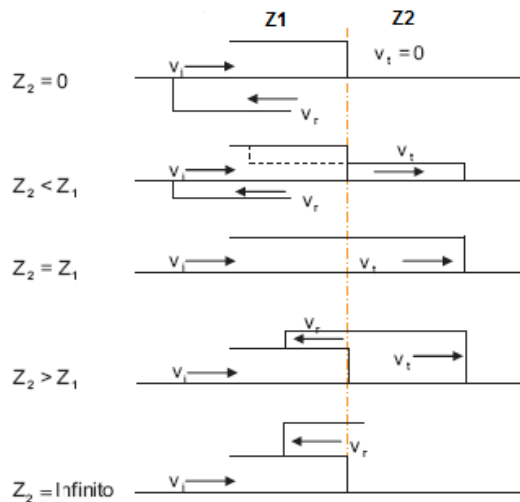


Figura C. 2 Resumen gráfico de las varias opciones de ondas de tensión.

Fuente: AYORA Paúl, Folleto de Diseño en Alto Voltaje [6], EPN.



ANEXO D: INSTALACIÓN DEL ATPDRAW

En este anexo se explica rápidamente la instalación del software ATPDraw
La carpeta comprimida del programa EMTP ATP, contiene los siguientes archivos que se observan en la siguiente figura

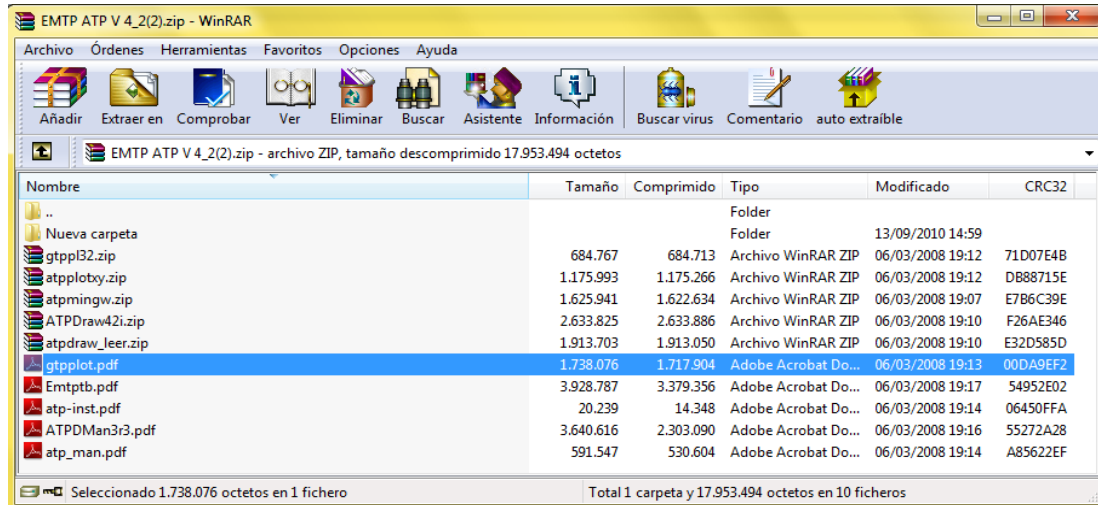


Figura D. 1 Carpeta comprimida con los archivos del programa ATPDraw

Lo primero que se realiza es crear una carpeta con el nombre ATPDRAW en la unidad C; luego se copia en la misma los archivos carpeta comprimida ATPDraw42i.zip, quedando la carpeta ATPDRAW como en la figura siguiente:

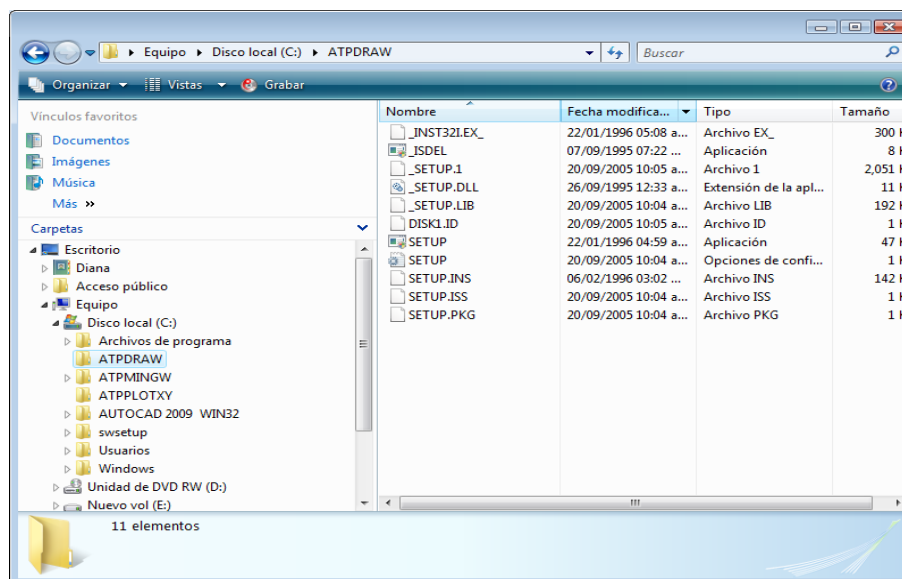


Figura D. 2 Archivos copiados en la carpeta ATPDRAW de la unidad C.



De la misma manera se crea en la unidad C, una carpeta con el nombre ATPMINGW y se copia en la misma, los archivos de la carpeta comprimida atpmingw.zip.

Del mismo modo se crea una carpeta de nombre ATPPLOTXY en la unidad C y se copia en esta carpeta los archivos que se encuentran en la carpeta comprimida atpprotxy.zip

Una vez que se tenga estas tres carpetas en el disco C, nos dirigimos a la carpeta ATPDRAW y se da doble click en SETUP.EXE, y se observara la siguiente pantalla

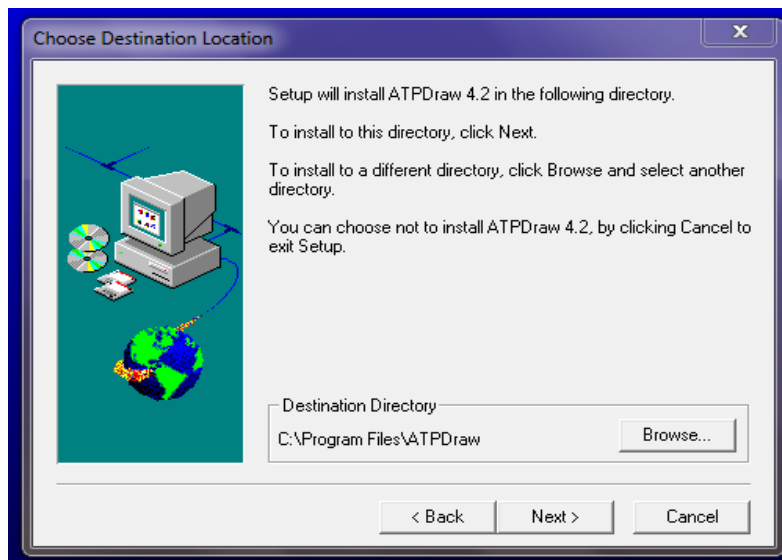


Figura D. 3 Ventana de instalación del programa ATPDraw

Aquí se elige el botón browse para instalar en la carpeta ATPDRAW creada anteriormente y luego se da click en next, hasta que aparece el icono de ATPDraw. Luego se espera unos segundos y aparece esta pantalla

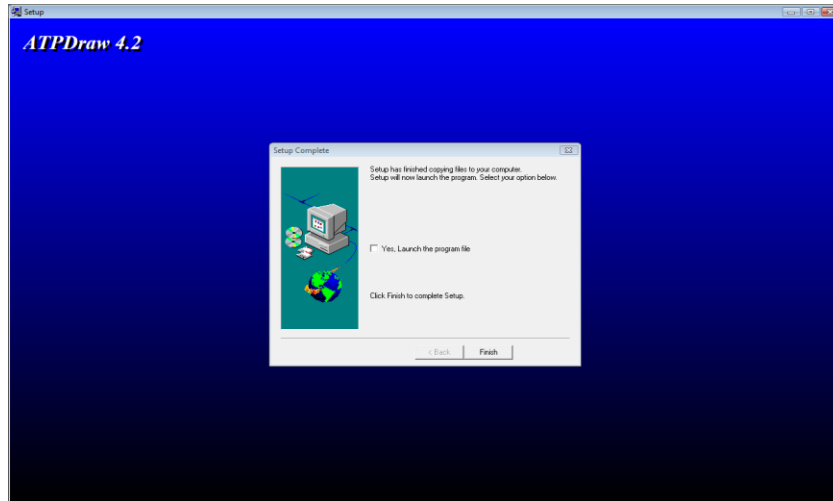


Figura D. 4 Ventana de finalización de la instalación del programa.

Aquí se termina la instalación del programa ATPDraw, se quita el símbolo chek del cuadro y luego se da click al botón finish.

Una vez realizado lo anterior, nos dirigimos a la carpeta ATPDRAW donde se instalo el programa y se da doble click en el símbolo del ATPDraw, apareciendo la pantalla siguiente

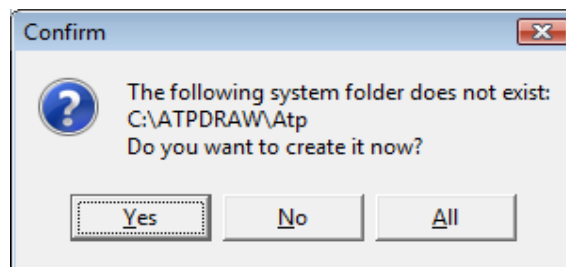


Figura D. 5 Creación de la carpeta Atp.

Aquí se da click en yes indicando que se acepta crear la carpeta Atp y enseguida aparece la siguiente pantalla

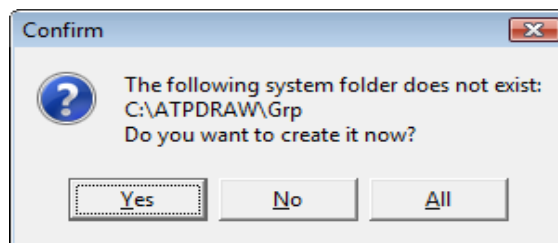


Figura D. 6 Creación de la carpeta Grp.

Nuevamente se da click en yes para crear la carpeta Grp.

De la misma manera que antes, se crean también las carpetas Mod, Lcc, Bct.



Luego de crear todas las carpetas mencionadas anteriormente, aparece la pantalla del ATPDraw.

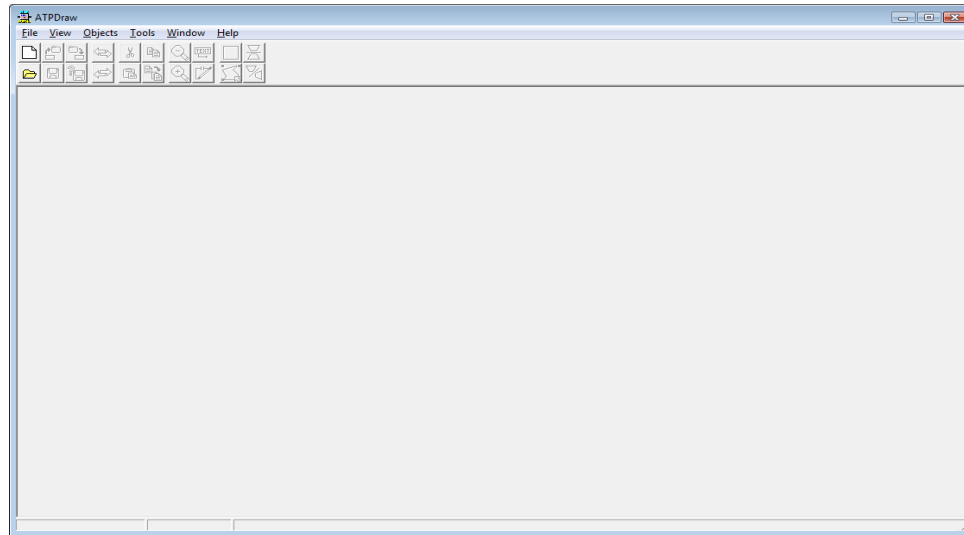


Figura D. 7 Ventana vacía del ATPDraw.

En esta pantalla se selecciona la opción File/open y se abre cualquier archivo, en este caso exa_1 y aparece una pantalla como la siguiente

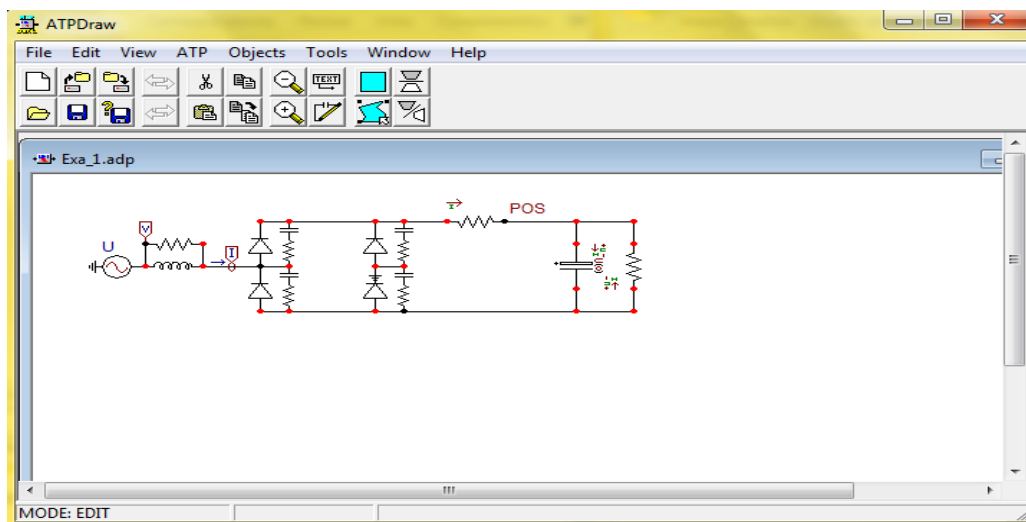


Figura D. 8 Ventana del ATPDraw con el ejemplo 1.

En esta pantalla se selecciona ATP/EDIT COMMANDS, apareciendo la pantallita de EDIT COMMANDS.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

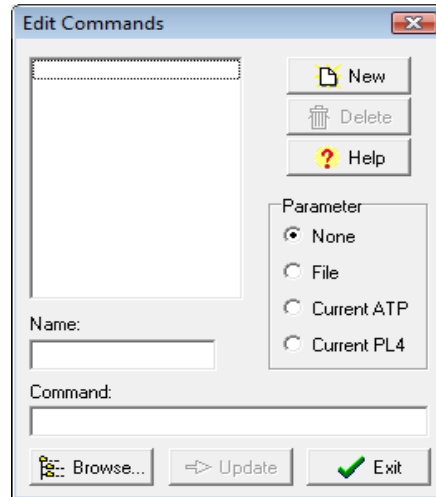


Figura D. 9 Ventana para editar comandos del ATPDraw

En esta pantalla se crean los siguientes comandos oprimiendo el botón NEW

NAME: run &ATP

COMMAND: c:\atpmingw\runtpgw.bat

PARAMETER: Current ATP

Se oprime el botón UPDATE y luego nuevamente NEW

NAME: run &PLOTXY

COMMAND: c:\atplotxy\plotxy.exe

PARAMETER: Current PL4

Se oprime el botón UPDATE y luego nuevamente NEW

NAME: run &EDIT

COMMAND: notepad.exe

PARAMETER: Current File

Se oprime el botón UPDATE.

De esta manera la pantalla anterior queda de la siguiente manera

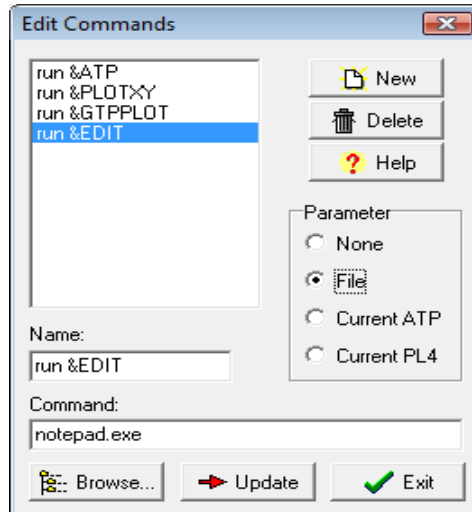


Figura D. 10 Ventana con los comandos editados del ATPDraw.

En la pantalla anterior se da click en Exit y luego se elige TOOLS/SAVE OPTIONS.

En seguida se selecciona TOOLS / OPTIONS / PREFERENCES y se escribe en la siguiente pantalla, las siguientes opciones:

Text editor: notepad.exe

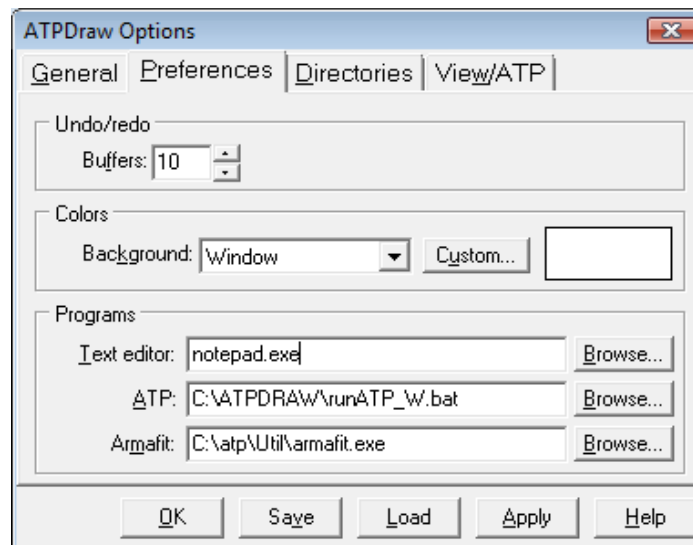


Figura D. 11 Ventana de opciones del ATPDraw.

Y también se reemplaza lo existente con:

ATP: c:\atpmingw\runtpgw.bat

Armafit: c:\atpmingw\armafit.exe

Luego se selecciona SAVE / OK; y para terminar TOOLS/SAVE OPTIONS.



Realizado lo anterior se cierra la ventana de APTDRAW.

En panel de control se elige el icono de sistema, y se entra en cambiar configuración (lado derecho inferior), se elige la pestaña de opciones avanzadas y aquí se da click en variables de entorno, apareciendo la siguiente pantalla

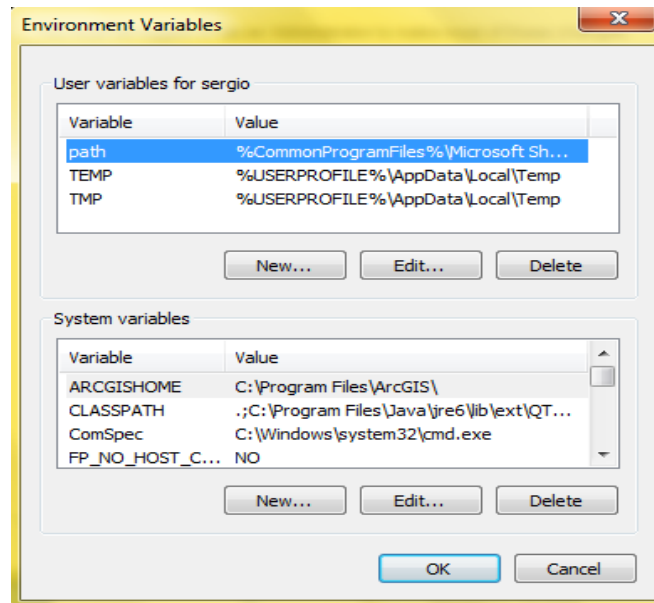


Figura D. 12 Ventana de variables de entorno del sistema

En esta pantalla nos ubicamos en la segunda ventana, se da click en New y aparece la siguiente pantalla, donde se ingresan los datos mostrados:

En nombre de la variable escribir: GNUDIR

En valor de la variable escribir: C:\ATPMINGW\

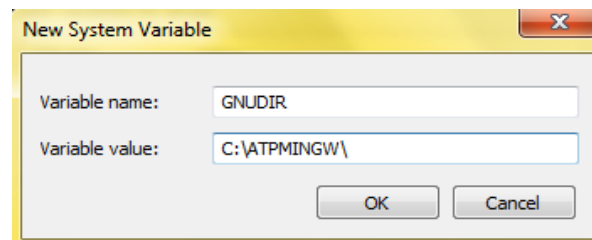


Figura D. 13 Ventana de nueva variable del sistema.

Luego se da click en ok.

Se revisa lo hecho, se reinicie la computadora (haciendo todas las acciones normales) y se arranca nuevamente; ahora está todo listo para ejecutar el ATPDraw.



ANEXO E: EXPLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE UN CASO ESPECÍFICO EN ATPDRAW

Con el objeto de explicar los pasos que se realizan para llevar a cabo las diferentes simulaciones, se escogió la simulación en funcionamiento normal del sistema a 69kV.

Lo primero que se realiza es construir el diagrama del sistema en la pantalla del ATPDraw de la siguiente manera:

Se abre el programa y se selecciona File/New y aparece una pantalla que tiene extensión .adp y es aquí donde se construye el sistema para su respectiva simulación.

En esta pantalla se da click derecho y se despliegan los diferentes componentes que se pueden utilizar para la construcción del sistema eléctrico

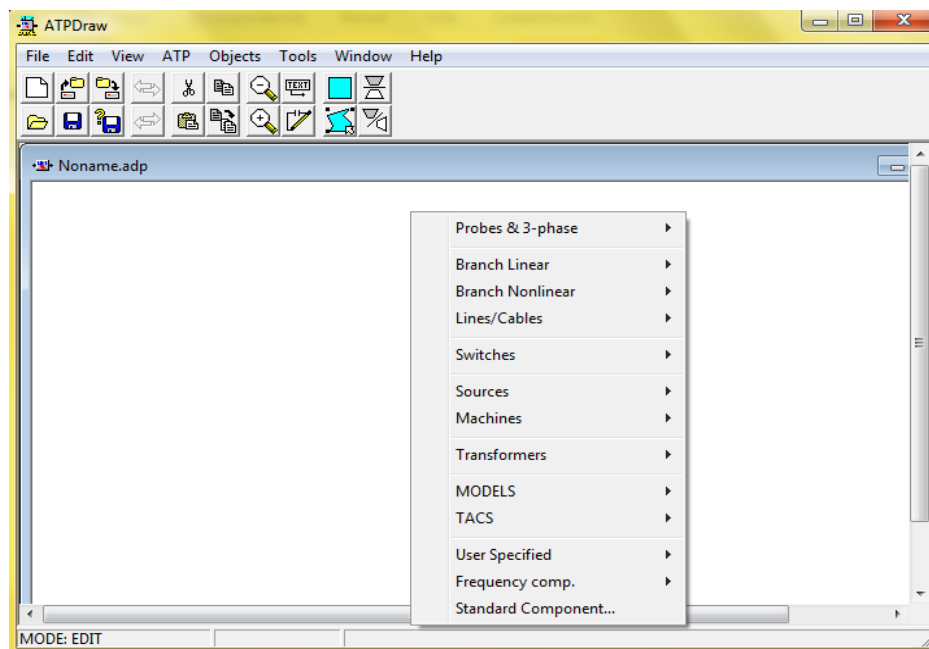


Figura E. 1 Ventana del ATPDraw con los elementos que se utilizan para la construcción del sistema

Cada una de estas pestañas contiene varias opciones y se puede escoger según lo que se requiera.

Luego de seleccionar adecuadamente los diferentes elementos del SEP (fuentes, líneas, transformadores, impedancias, interruptores, etc.) y llenar su información



UNIVERSIDAD DE CUENCA

correspondiente según los cuadros de diálogo mostrados en el capítulo 3, se obtiene el diagrama del SEP ingresado en la pantalla de ATPDraw como en la figura siguiente:

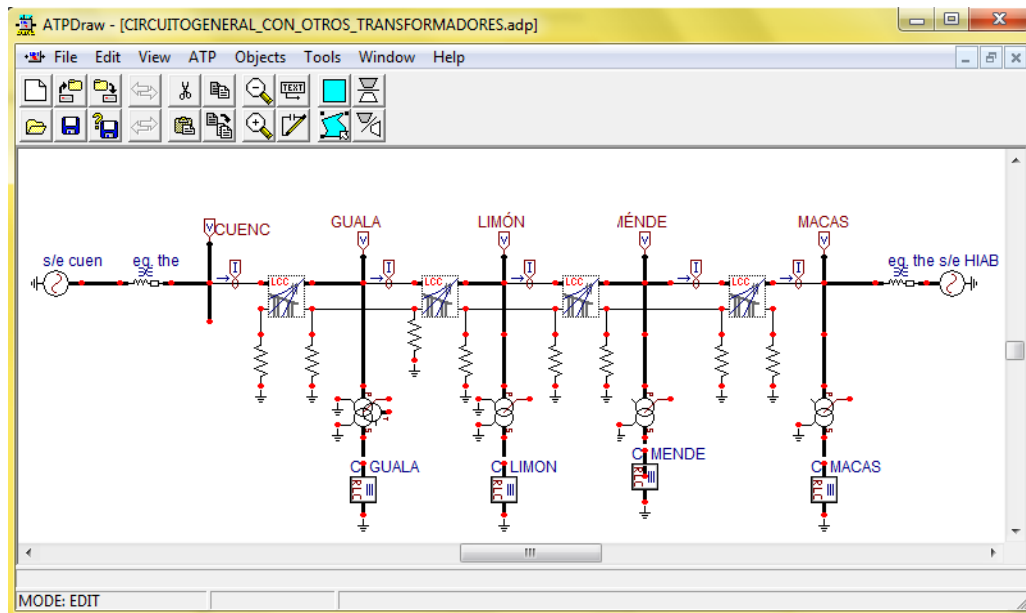


Figura E. 2 Ventana del ATPDraw con el diagrama de la línea Cuenca-Macas a 69kV

Este diagrama en ATPDraw se guarda dándole un nombre y con extensión .adp; para proceder inmediatamente a su respectiva simulación.

En la pantalla anterior se da click en la pestaña ATP y luego en run ATP, de esta manera el programa comienza a generar los resultados de la simulación, tanto gráficamente (archivo .pl4) como textualmente (archivo .lis).

Para observar los resultados gráficamente se realiza lo siguiente:

Se da click en la pestaña ATP y se elige runPLOTXY, apareciendo la siguiente pantalla

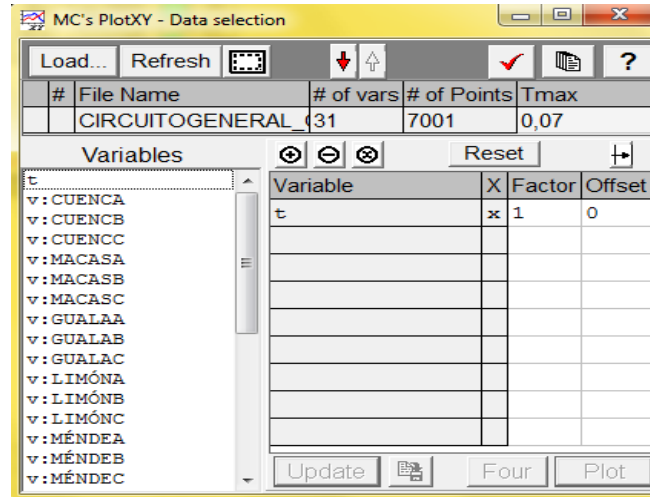


Figura E. 3 Ventana Plotxy/selección de datos, para observar los resultados gráficos

En esta pantalla aparecen todos los puntos con su respectivo nombre, donde se colocó un Probe Volt y un Probe Curr para obtener los resultados de tensión y de corriente en el sistema ingresado en ATPDraw.

En la pantalla anterior, se da click en el nombre de los puntos donde se desea obtener los resultados gráficos, luego se da click en Plot y de esta manera se obtienen los resultados gráficos de la simulación.

A continuación se muestra las tensiones y las corrientes de las fases en la subestación Cuenca Rayoloma, obtenidas según la explicación anterior.

Para obtener los gráficos por separado, primero se seleccionan las tensiones de las fases A, B y C, se da click en Plot obteniéndose la siguiente figura

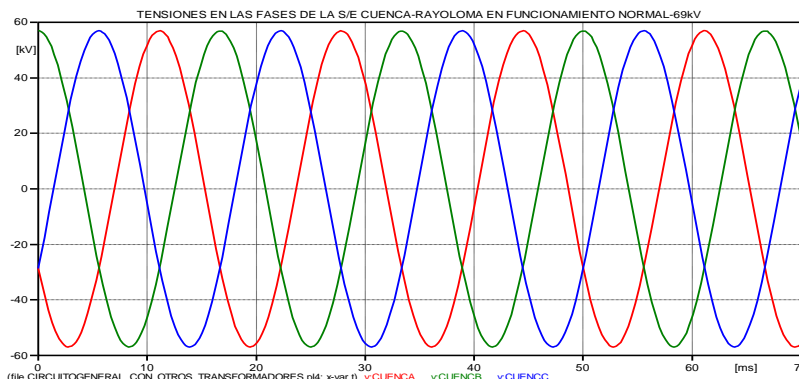


Figura E. 4 Tensiones en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma a 69kV

De la misma manera se obtiene la corriente de las tres fases A, B y C.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

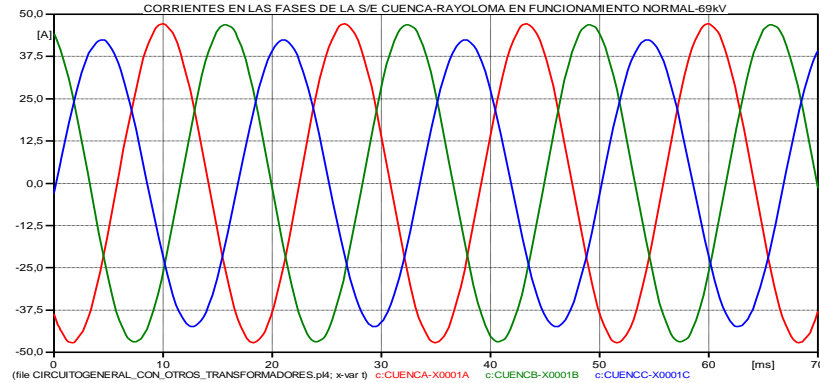


Figura E. 5 Corrientes en las fases de la S/E Cuenca Rayoloma a 69kV

Para obtener los resultados en forma de texto, se da click en la pestaña ATP y se selecciona runEDIT; luego se elige el nombre del proyecto del cual se desea observar los resultados, agregándole .lis a su nombre respectivo y después enter, desplegándose de esta manera una pantalla en Notepad, el cual contiene en una primera parte toda la información (datos) ingresada del sistema y en una segunda parte los resultados de la simulación.

Los resultados que tienen mayor importancia para este estudio, son las variables máximas de salida, que se observan de la siguiente manera

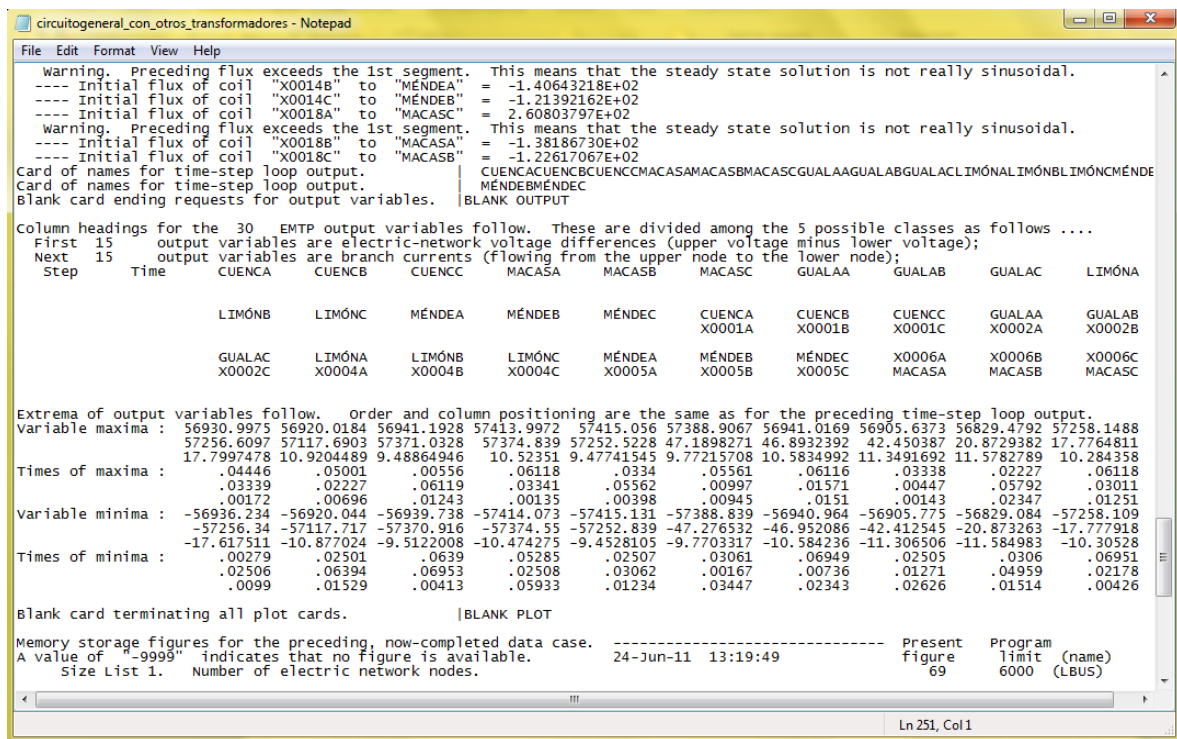


Figura E. 6 Ventana en Notepad con las variables máximas de salida